



**Mike Dos Santos  
Lopes**

**Avaliação da eficácia energética no  
ensaio SPT.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Dr. Carlos Manuel Gonçalves Rodrigues, Professor adjunto do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Politécnico da Guarda e do Professor Nuno Bravo de Faria Cruz, Professor auxiliar convidado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

## **o júri**

presidente

Prof. Jorge Manuel Pessoa Girão Medina  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Fernando Ernesto Rocha de Almeida  
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Nuno Bravo de Faria Cruz  
professor auxiliar convidado da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Dr. Carlos Manuel Gonçalves Rodrigues  
professor adjunto do Instituto Politécnico da Guarda (orientador)

“O único lugar onde o sucesso  
vem antes do trabalho é no  
dicionário.”

*Albert Einstein*

Dedico este trabalho à “Maria Aldina” e ao “Caroço”.  
Obrigado por tudo. Sem vocês isto não seria possível.

## **Agradecimentos**

Antes de mais, quero agradecer às duas pessoas responsáveis pela realização desta dissertação, o Engenheiro Nuno Bravo de Faria Cruz e o Doutor Engenheiro Carlos Manuel Gonçalves Rodrigues. Sem vós, isto nunca teria sido possível. Muito obrigado pelo vosso imenso apoio e confiança depositada, esperando não ter desiludido;

Aos meus pais, a quem dedico este feito, por me terem sempre apoiado e nunca deixarem que desistisse, por me terem fornecido todos os bens necessários e ensinado o significado do sacrifício. A vós, que devo tudo, o meu mais sincero obrigado.

A minha irmã, que embora esteja longe, sempre me deu força;

A minha madrinha, por ter sido uma segunda mãe;

A todas as pessoas, que voluntariamente ou involuntariamente, entraram na minha vida. Graças a vocês sou a pessoa que sou hoje e por isso agradeço-vos. Mas principalmente aos meus amigos:



Marco e Miguel, pelos maravilhosos anos de infância e adolescência;

Peixe por continuar sempre a ser o meu vizinho;

Néu, que me acompanha desde do início;

Mimoso, pelo significado de camaradagem;

Catarina e ao seu sorriso, que me mostraram que apesar de tudo é possível viver a vida sempre com um sorriso nos lábios;

David, por ser aquele irmão que nunca tive;

“Tripé fantástico”, por serem como são;

Elementos do “MAL”, pela amizade fornecida;

Engenheira, pelo apoio e disponibilidade fornecida nesta nova fase da minha vida;

Professor Nuno, por me estar sempre a ensinar novas coisas da vida;

Mas também aos colegas e amigos do curso, que me proporcionaram cinco maravilhosos anos de vida;

Aos amigos de Tondela, que apesar de tudo fazem com que nos mantenhamos juntos;

Às pessoas do Geociências por todo o apoio fornecido durante a minha vida académica, em especial à Dona Graça, que se revelou um autentico anjo.

E por fim à minha menina, que apesar da pouca idade, me faz esquecer os problemas que todos nos temos.

A todos vós, muito obrigado.

## **Palavras-chave**

SPT, Força, Velocidade, Eficácia, Energia Frequência, Batente

## **Resumo**

Esta tese de fim de curso aborda a influência das perdas de energia num dos ensaios de caracterização geotécnica mais usados em todo o mundo, o *Standard Penetration Test*, mais conhecido como SPT.

Essas perdas de energia afectam os resultados do ensaio, sendo que nesta tese, se quantificou a eficácia energética de modo a se tentar perceber a influência dessas perdas nos resultados finais.

Para tal, realizou-se uma campanha de três ensaios na Guarda analisando-se posteriormente, com ajuda de software (Pile Driving Analyser ®), os 163 golpes resultantes da mesma. Nesta campanha para além da medição da energia transferida ao trem de varas, também se avaliou a altura de queda e a velocidade de impacto do martelo, observando-se no final do ensaio a existência de uma diferença entre a energia teórica e a energia medida.

## **Keywords**

SPT, Strength, Speed, Effectiveness, Energy, Frequency, Anvil

## **Abstract**

This graduation's work addresses the impact of the loss of energy in one of the most used tests of geotechnical characterization throughout the world, the Standard Penetration Test, better known as SPT.

These losses of energy affect the test results, so in this graduation's work we quantified the energy efficiency in order to try to understand the influence of those losses in the final results.

To this end, a campaign of three tests was performed in Guarda analyzing later, with help of software (Pile Driving Analyzer ®), the 163 blows from this campaign.

In this campaign beyond the measurement of energy transferred to the poles, we also evaluated the height of fall and the velocity impact of the hammer. Looking at the end of the test that there exists a difference between the theoretical and measure energy.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1. ENQUADRAMENTO GEOTÉCNICO.....	18
1.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	19
1.3- SUBDIVISÃO DOS CAPÍTULOS .....	20
<b>2. O ENSAIO SPT .....</b>	<b>22</b>
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	22
2.2. EQUIPAMENTO .....	22
2.2.1. <i>Amostrador</i> .....	23
2.2.2. <i>Varas</i> .....	24
2.2.3. <i>Dispositivo de queda</i> .....	24
2.3. A HISTÓRIA DO SPT.....	25
2.4. EXECUÇÃO DO ENSAIO.....	29
2.5. NORMAS .....	31
2.6. CUIDADOS A OBSERVAR .....	32
2.7. VANTAGENS E DESVANTAGENS .....	33
2.8. SELECÇÃO DE ENSAIOS GEOTÉCNICOS .....	34
2.9. FACTORES QUE INFLUENCIAM OS RESULTADOS DO SPT.....	36
2.10. CORRECÇÕES DOS RESULTADOS.....	39
2.11. CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS .....	42
2.11.1. <i>Solos arenosos</i> .....	43
2.11.2. <i>Solos argilosos</i> .....	45
<b>3. MEDIDAS DE ENERGIA DE ENSAIO NO SPT .....</b>	<b>47</b>
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	47
3.2. ENERGIA POTENCIAL GRAVÍTICA .....	47
3.3. ENERGIA CINÉTICA EXISTENTE AQUANDO DO IMPACTO .....	49
3.3.1. <i>Energia cinética teórica</i> .....	49
3.3.2. <i>Energia cinética real</i> .....	50
3.4. ENERGIA TRANSFERIDA AO BATENTE DO ENSAIO .....	51
3.5. ENERGIA TRANSFERIDA AO AMOSTRADOR .....	54
<b>4. EQUIPAMENTO UTILIZADO.....</b>	<b>58</b>
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	58
4.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SPT ANALYZER) .....	60

<b>5. ENSAIOS PRÁTICOS DA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>81</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	81
5.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO .....	81
5.3. CAMPANHAS DE ENSAIO .....	83
5.4. EXECUÇÃO DO ENSAIO.....	87
5.4.1. <i>Furação e execução do ensaio.....</i>	<i>87</i>
5.4.2. <i>Medição da altura e da frequência de queda do martelo.....</i>	<i>91</i>
<b>6. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>94</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	94
6.2. FUROS F1 E F2.....	94
6.3. FUROS F1 E F3.....	103
6.4. VALORES MÉDIOS.....	112
<b>7. ANÁLISE E CONCLUSÕES DOS RESULTADO .....</b>	<b>116</b>
7.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	116
7.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	125
7.2.1. <i>Furos F1 e F2 .....</i>	<i>125</i>
7.2.2. <i>Furos F1 e F3 .....</i>	<i>125</i>
7.2.3. <i>Análise comum às duas partes .....</i>	<i>126</i>
7.3. CONCLUSÕES.....	127
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>133</b>
<b>9. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>137</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>139</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>148</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: REPRESENTAÇÃO DAS VÁRIAS PARTES CONSTITUINTES DO AMOSTRADOR.....	23
FIGURA 2.2: LAY-OUT DO ENSAIO SPT, CESTARI, 1990 .....	25
FIGURA 2.3: ESQUEMA BASE DO AMOSTRADOR TIPO RAYMOND (HVORSLEV, 1949).....	27
FIGURA 2.4: ÁBACO RELATIVO AO FACTOR DE CORRECÇÃO $C_N$ APRESENTADO POR TOKIMATSU, 1988. RETIRADO DE CESTARI, 1990 .....	42
FIGURA 2.5: CORRELAÇÕES ENTRE OS VALORES DO SPT E A DENSIDADE RELATIVA (GIBBS & HOLTZ, 1957; HOLTZ AND GIBBS, 1979) .....	44
FIGURA 2.6: ÂNGULO DE ATRITO EM FUNÇÃO DOS VALORES DO SPT, DE MELLO (1971) E DÉCOURT (1989) RESPECTIVAMENTE .....	44
FIGURA 2.7: ÂNGULO DE ATRITO EM FUNÇÃO DA DENSIDADE RELATIVA, SCHMERTMANN (1977) E WINTERKORN & FANG (1975) RESPECTIVAMENTE .....	45
FIGURA 2.8: RESISTÊNCIA AO CORTE NÃO DRENADA EM ARGILAS SATURADAS (NAV-FAC DESIGN MANUAL, 1982) .....	46
FIGURA 3.1: ALTURA DE QUEDA VS VELOCIDADE DE GOLPES (KOVACS, 1979).....	49
FIGURA 3.2: EFICIÊNCIA DO ENSAIO SPT VS COMPRIMENTO DAS VARAS UTILIZADAS NO ENSAIO (MORGANO & LIANG 1992.....	57
FIGURA 4.1: SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SPT ANALYZER).....	61
FIGURA 4.2: SISTEMA DE AQUISIÇÃO, EXIBIÇÃO E GRAVAÇÃO DE DADOS .....	62
FIGURA 4.3: CARTÃO DE MEMÓRIA DA CONSOLA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	63
FIGURA 4.4: LOCAL DE ENCAIXE DO CARTÃO DE MEMÓRIA NA CONSOLA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	63
FIGURA 4.5: CABOS DE CONEXÃO DO SPT ANALYZER .....	64
FIGURA 4.6: SISTEMA DE CONEXÃO RÁPIDA.....	65
FIGURA 4.7: MEDIDORES DE DEFORMAÇÃO .....	66
FIGURA 4.8: POSIÇÃO DOS MEDIDORES DE DEFORMAÇÃO E ACELERÓMETROS .....	67
FIGURA 4.9: ACELERÓMETROS APARAFUSADOS OPOSTAMENTE UM AO OUTRO.....	68
FIGURA 4.10: BLOCO DE PROTECÇÃO DOS ACELERÓMETROS .....	68
FIGURA 4.11: VARA INSTRUMENTADA NA QUAL SE ENCONTRAM OS MEDIDORES DE DEFORMAÇÃO E ACELERÓMETROS .....	69
FIGURA 4.12: DIFERENÇA DE TEMPO ENTRE OS TEMPOS DE CHEGADA DO SINAL DE FORÇA E DE VELOCIDADE .....	70
FIGURA 4.13: ESQUEMA EXEMPLIFICATIVO DA POSIÇÃO DOS SENSORES UTILIZADOS NESTA DISSERTAÇÃO .....	71
FIGURA 4.14: ESQUEMA EXEMPLIFICATIVO DA POSIÇÃO HABITUALMENTE UTILIZADA DOS SENSORES .....	71
FIGURA 4.15: REPRESENTAÇÃO DUM REGISTO CAPTADO E EXIBIDO PELO SPT ANALYZER .....	72
FIGURA 4.16: ILUSTRAÇÃO DA MENSAGEM DE NOTIFICAÇÃO EXIBIDA NA CONSOLA DO SPT ANALYZER .	74
FIGURA 4.17: ILUSTRAÇÃO DO ASPECTO DO SOFTWARE PDA-W .....	76
FIGURA 4.18: EQUIPAMENTO DE FURAÇÃO UTILIZADO PARA A EXECUÇÃO DOS ENSAIOS SPT .....	77

FIGURA 4.19: REPRESENTAÇÃO DAS VARAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS ASSIM COMO AS SUAS CARACTERÍSTICAS .....	78
FIGURA 4.20: REPRESENTAÇÃO DO AMOSTRADOR UTILIZADO NOS ENSAIOS ASSIM COMO AS SUAS CARACTERÍSTICAS .....	78
FIGURA 4.21: AMOSTRADOR UTILIZADO NOS ENSAIOS DESMONTADO .....	79
FIGURA 4.22: BATENTE USADO EM QUATRO DAS SEIS CAMPANHAS DE ENSAIO REALIZADAS.....	79
FIGURA 4.23: BATENTE USADO NAS RESTANTES DUAS CAMPANHAS DE ENSAIO .....	80
FIGURA 4.24: ILUSTRAÇÃO DOS DOIS BATENTES UTILIZADOS NESTA DISSERTAÇÃO .....	80
FIGURA 5.1: ZONA ENSAIADA.....	81
FIGURA 5.2: ENXERTO DO MAPA GEOGRÁFICO DA ZONA ESTUDADA (GUARDA) .....	82
FIGURA 5.3: EXCERTO DO MAPA GEOLÓGICO DA ZONA INVESTIGADA .....	82
FIGURA 5.4: REPRESENTAÇÃO DOS GRANITOS DA ZONA DA GUARDA.....	83
FIGURA 5.5: LOCALIZAÇÃO DOS FUROS NOS QUAIS SE REALIZARAM AS CAMPANHAS DE ENSAIO.....	84
FIGURA 5.6: BATENTES USADOS NAS CAMPANHAS DE ENSAIO .....	85
FIGURA 5.7: SISTEMA DE CONTROLO DO NIVELAMENTO DA MÁQUINA DE FURAÇÃO.....	88
FIGURA 5.8: LIMPEZA DOS RESÍDUOS AQUANDO DA FURAÇÃO.....	89
FIGURA 5.9: CABEÇA DE ROTAÇÃO DA MÁQUINA DE FURAÇÃO .....	90
FIGURA 5.10: PEÇA CENTRALIZADORA DO TREM DE VARAS .....	90
FIGURA 5.11: MARCAÇÃO DOS INTERVALOS DE MEDIDA DO ENSAIO (15CM) .....	91
FIGURA 5.12: ILUSTRAÇÃO DO MARCADOR COLADO NA PARTE SUPERIOR DO MARTELO E EM CONTACTO COM OS VEIOS HIDRÁULICOS DO EQUIPAMENTO .....	92
FIGURA 5.13: MARCA DEIXADA PELO MARCADOR NO VEIO HIDRÁULICO DO EQUIPAMENTO AO SER LEVANTADO POR ESTE.....	92
FIGURA 5.14: REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO USADO PARA A DETERMINAÇÃO DA ALTURA DE QUEDA DO MARTELO.....	93
FIGURA 6.1: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE PARA N=1.....	99
FIGURA 6.2: GRÁFICOS TEMPO VS DESLOCAMENTO E TEMPO VS ENERGIA EFV PARA N=1 .....	99
FIGURA 6.3: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE PARA N=25 E N=27, RESPECTIVAMENTE .....	100
FIGURA 6.4: GRÁFICOS TEMPO VS DESLOCAMENTO E TEMPO VS ENERGIA EFV PARA N=25 E N=27, RESPECTIVAMENTE .....	100
FIGURA 6.5: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE PARA N=1.....	101
FIGURA 6.6: GRÁFICOS TEMPO VS DESLOCAMENTO E TEMPO VS ENERGIA EFV PARA N=1 .....	101
FIGURA 6.7: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE PARA N=31 E N=29, RESPECTIVAMENTE .....	102
FIGURA 6.8: GRÁFICOS TEMPO VS DESLOCAMENTO E TEMPO VS ENERGIA EFV PARA N=31 E N=29, RESPECTIVAMENTE .....	102
FIGURA 6.9: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE PARA N=1.....	108
FIGURA 6.10: GRÁFICOS TEMPO VS DESLOCAMENTO E TEMPO VS ENERGIA EFV PARA N=1 .....	108

FIGURA 6.11: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE PARA N=25.....	109
FIGURA 6.12: GRÁFICOS TEMPO VS DESLOCAMENTO E TEMPO VS ENERGIA EFV PARA N=25 .....	109
FIGURA 6.13: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE PARA N=1.....	110
FIGURA 6.14: GRÁFICOS TEMPO VS DESLOCAMENTO E TEMPO VS ENERGIA EFV PARA N=1 .....	110
FIGURA 6.15: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE PARA N=31 E N=26, RESPECTIVAMENTE .....	111
FIGURA 6.16: GRÁFICOS TEMPO VS DESLOCAMENTO E TEMPO VS ENERGIA EFV PARA N=31 E N=26, RESPECTIVAMENTE .....	111
FIGURA 7.1: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE DA PRIMEIRA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F1.....	119
FIGURA 7.2: GRÁFICOS TEMPO VS PENETRAÇÃO DEFINITIVA E TEMPO VS ENERGIA EVF DA PRIMEIRA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F1 .....	119
FIGURA 7.3: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE DA ÚLTIMA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F1.....	120
FIGURA 7.4: GRÁFICOS TEMPO VS PENETRAÇÃO DEFINITIVA E TEMPO VS ENERGIA EVF DA ÚLTIMA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F1 .....	120
FIGURA 7.5: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE DA PRIMEIRA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F2.....	121
FIGURA 7.6: GRÁFICOS TEMPO VS PENETRAÇÃO DEFINITIVA E TEMPO VS ENERGIA EVF DA PRIMEIRA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F2 .....	121
FIGURA 7.7: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE DA ÚLTIMA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F2.....	122
FIGURA 7.8: GRÁFICOS TEMPO VS PENETRAÇÃO DEFINITIVA E TEMPO VS ENERGIA EVF DA ÚLTIMA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F2 .....	122
FIGURA 7.9: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE DA PRIMEIRA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F3.....	123
FIGURA 7.10: GRÁFICOS TEMPO VS PENETRAÇÃO DEFINITIVA E TEMPO VS ENERGIA EVF DA PRIMEIRA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F2 .....	123
FIGURA 7.11: GRÁFICOS TEMPO VS FORÇA E TEMPO VS VELOCIDADE DA ÚLTIMA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F3.....	124
FIGURA 7.12: GRÁFICOS TEMPO VS PENETRAÇÃO DEFINITIVA E TEMPO VS ENERGIA EVF DA ÚLTIMA PANCADA DAS CAMPANHAS REALIZADAS A UM E DOIS METROS DE PROFUNDIDADE NO FURO F3 .....	124
FIGURA 7.13: ESQUEMA DA CIRCUNFERÊNCIA SEMI-PARTIDA .....	128
FIGURA 7.14: POSIÇÃO CORRECTA DA CIRCUNFERÊNCIA SEMI PARTIDA AQUANDO DA LIBERTAÇÃO DO MARTELO.....	128
FIGURA 7.15: DUAS DAS POSSÍVEIS POSIÇÕES DA CIRCUNFERÊNCIA SEMI PARTIDA AQUANDO DO INICIO DA PRIMEIRA PANCADA.....	129



## ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 2.1: QUADRO RESUMO DOS VÁRIOS PARÂMETROS QUE CADA ENSAIO PERMITE DETERMINAR.....	35
QUADRO 2.2: QUADRO RESUMO DAS VÁRIAS CARACTERÍSTICAS DOS TIPOS DE MARTELOS USADOS NO MUNDO. RETIRADO DE CAVALCANTE (2002) .....	<b>ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.</b>
QUADRO 2.3: QUADRO RESUMO DOS VÁRIOS FACTORES QUE PODEM AFECTAR OS RESULTADOS DO SPT, SEGUNDO CAVALCANTE (2002).....	38
QUADRO 2.4: VALORES DOS VÁRIOS FACTORES DE CORRECÇÃO DE ACORDO COM AS CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO UTILIZADO .....	40
QUADRO 2.5: CORRELAÇÕES ENTRE A COMPACIDADE DOS SOLOS ARENOSOS COM OS VALORES DO SPT ASSIM COMO DA DENSIDADE RELATIVA .....	43
QUADRO 2.6: CORRELAÇÕES ENTRE A CONSISTÊNCIA E DOS SOLOS ARGILOSOS COM OS VALORES DO SPT, PECK, HANSON & THORNBURN (1974) .....	45
QUADRO 3.1: FACTORES DE CORRECÇÃO PARA OS VALORES DE NSPT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DAS VARAS.....	57
QUADRO 4.1: FACTORES DE CALIBRAÇÃO DOS VÁRIOS SENSORES UTILIZADOS.....	73
QUADRO 5.1: QUADRO RESUMO DOS VALORES DE $N_{SPT}$ OBTIDOS EM CADA ENSAIO .....	86
QUADRO 6.1: QUADRO RESUMO DOS VALORES MEDIDOS DIRECTAMENTE NOS FUROS F1 E F2 À PROFUNDIDADE DE UM METRO .....	95
QUADRO 6.2: QUADRO RESUMO DOS VALORES DA EFICÁCIA PARA CADA PANCADA DOS FUROS F1 E F2, A UM METRO DE PROFUNDIDADE .....	96
QUADRO 6.3: QUADRO RESUMO DOS VALORES MEDIDOS DIRECTAMENTE NOS FUROS F1 E F2 À PROFUNDIDADE DE DOIS METROS.....	97
QUADRO 6.4: QUADRO RESUMO DOS VALORES DA EFICÁCIA PARA CADA PANCADA DOS FUROS F1 E F2, A DOIS METROS DE PROFUNDIDADE.....	98
QUADRO 6.5: QUADRO RESUMO DOS VALORES DAS MEDIÇÕES DA FREQUÊNCIA DE QUEDA DO MARTELO NOS FUROS F1 E F2.....	103
QUADRO 6.6: QUADRO RESUMO DOS VALORES MEDIDOS DIRECTAMENTE NOS FUROS F1 E F3 À PROFUNDIDADE DE UM METRO .....	104
QUADRO 6.7: QUADRO RESUMO DOS VALORES DA EFICÁCIA PARA CADA PANCADA DOS FUROS F1 E F3, A UM METRO DE PROFUNDIDADE .....	105
QUADRO 6.8: QUADRO RESUMO DOS VALORES MEDIDOS DIRECTAMENTE NOS FUROS F1 E F3 À PROFUNDIDADE DE DOIS METROS.....	106
QUADRO 6.9: QUADRO RESUMO DOS VALORES DA EFICÁCIA PARA CADA PANCADA DOS FUROS F1 E F3, A DOIS METROS DE PROFUNDIDADE.....	107
QUADRO 6.10: QUADRO RESUMO DOS VALORES DAS MEDIÇÕES DA FREQUÊNCIA DE QUEDA DO MARTELO NOS FUROS F1 E F3.....	112
QUADRO 6.11: QUADRO RESUMO DOS VALORES DAS MEDIÇÕES DA ALTURA DE QUEDA DO MARTELO NOS FUROS F1 E F3.....	112

QUADRO 6.12: QUADRO RESUMO DOS VALORES MÉDIOS OBTIDOS NO FURO F1 À PROFUNDIDADE DE UM METRO .....	113
QUADRO 6.13: QUADRO RESUMO DOS VALORES MÉDIOS OBTIDOS NO FURO F1 À PROFUNDIDADE DE DOIS METROS .....	113
QUADRO 6.14: QUADRO RESUMO DOS VALORES MÉDIOS OBTIDOS NO FURO F2 À PROFUNDIDADE DE UM METRO .....	114
QUADRO 6.15: QUADRO RESUMO DOS VALORES MÉDIOS OBTIDOS NO FURO F2 À PROFUNDIDADE DE DOIS METROS .....	114
QUADRO 6.16: QUADRO RESUMO DOS VALORES MÉDIOS OBTIDOS NO FURO F3 À PROFUNDIDADE DE UM METRO .....	115
QUADRO 6.17: QUADRO RESUMO DOS VALORES MÉDIOS OBTIDOS NO FURO F3 À PROFUNDIDADE DE DOIS METROS .....	115
QUADRO 7.1: QUADRO RESUMO DAS DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES MÉDIOS DE CADA PARÂMETRO DOS FUROS F1 E F2, PARA A PROFUNDIDADE DE UM METRO .....	116
QUADRO 7.2: QUADRO RESUMO DAS DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES MÉDIOS DE CADA PARÂMETRO DOS FUROS F1 E F2, PARA A PROFUNDIDADE DE DOIS METROS .....	117
QUADRO 7.3: QUADRO RESUMO DAS DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES MÉDIOS DE CADA PARÂMETRO DOS FUROS F1 E F3, PARA A PROFUNDIDADE DE UM METRO .....	117
QUADRO 7.4: QUADRO RESUMO DAS DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES MÉDIOS DE CADA PARÂMETRO DOS FUROS F1 E F3, PARA A PROFUNDIDADE DE DOIS METROS .....	118
QUADRO 7.5: QUADRO RESUMO DOS VALORES DOS DESVIOS PADRÃO DE CADA PARÂMETRO REGISTRADO .....	127
QUADRO 8.1: VALORES DE $N_{60}$ RELATIVOS AOS ENSAIOS REALIZADOS .....	136

## SIMBOLOGIA UTILIZADA

$a$	aceleração
$a$	área de secção transversal instrumentada
$A_f$	altura final do martelo
$A_i$	altura inicial do martelo
$A_{max}$	altura máxima do martelo
$A_1$	medidor de velocidade 1
$A_2$	medidor da velocidade 2
$c$	velocidade de propagação de impulsos de tensão
$C_B$	factor correctivo relativo ao comprimento do trem de varas
$cm$	centímetro
$C_N$	factor correctivo relativo à tensão efectiva vertical
$C_R$	factor correctivo relativo ao diâmetro do furo
$C_S$	factor correctivo relativo ao amostrador
$C_v$	coeficiente de consolidação
$DFN$	penetração definitiva do amostrador
$Dr$	densidade relativa
$E$	modulo de elasticidade
$E_c$	energia cinética
$EF_2$	energia medida apenas com base em valores de força
$E_r$	energia transmitida ao trem de varas
$EFV$	energia medida com base em valores de força e velocidade

$e_1$	factor de relação entre a energia cinética teórica e a energia medida imediatamente antes do impacto
$e_2$	factor de perda de energia relativa a massa do batente
E2F	energia medida apenas com base em valores de força mas com tempo de integração diferente da EF2
$e_3$	factor de perda de energia relativa ao comprimento do trem de varas
$E^*, E_T$	energia potencial gravítica
F	força
F	força medida no ensaio
FMX	força máxima de cada pancada
$F_s$	força exercida pelo solo no amostrador
F1	furo de ritmo lento
F1	medidor de força 1
F2	furo de ritmo elevado
F2	medidor de força 2
F3	furo de batente largo
g	força gravítica
g	grama
$G_0$	módulo de distorção
h	altura de queda do martelo
J	Joules
k	coeficiente de permeabilidade
kg	kilograma

kN	kilonewton
kPa	kilopascal
$K_1$	factor de correcção referente a posição de célula de carga
$K_2$	factor de correcção correspondente à relação entre a velocidade medida e a teórica
$K_2$	factor de correcção correspondente ao comprimento de onda
L	comprimento do martelo
l	comprimento total do trem de varas
m	massa do martelo
m	metro
MB	Megabyte
mm	milímetro
ms	milissegundo
mv	coeficiente de compressibilidade volumétrica
mV/g	milivolt por grama
m/s	metro por segundo
N	Newton
n	numero da pancada
$N_{SPT}$ cada	valor de N correspondente aos dois últimos trechos de 15 cm
$N_{60}$	valor de N correspondente à 60% da energia
$N(60)_1$	resultado de ensaio corrigido e normalizado para uma tensão efectiva vertical de 100 kPa.
OCR	grau de consolidação

$\rho_p$	massa específica da vara
SPT	Standard Penetration Test
$S_u$	resistência ao corte não-drenada
$t$	tempo
$u$	poro pressão "in situ"
$v$	velocidade
$V$	velocidade medida no ensaio
VMX	velocidade máxima de cada pancada
$\phi'$	ângulo efectivo de resistência :ao corte
$\pm$	mais ou menos
%	percentagem
$\sigma_h$	tensão horizontal
$\sigma'_{v0}$	tensão efectiva vertical
$\sigma - \epsilon$	relação tensão deformação

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento Geotécnico

A grande complexidade das construções dos tempos de hoje, assim como os níveis de segurança exigidos às mesmas durante os seus tempos de vida, fazem com que seja perfeitamente compreensível que a caracterização geotécnica tenha sucessivamente mais importância no mundo da construção.

A caracterização geotécnica baseia-se em testes sobre o material a ser usado de modo a obter informação sobre este. Para tal recorre-se aos vários tipos de ensaio disponíveis, nomeadamente os ensaios laboratoriais e os ensaios “in situ”.

Relativamente aos ensaios “in situ”, estes possuem uma importância fundamental na determinação das propriedades geotécnicas dos materiais, sendo que as suas principais vantagens relativamente aos ensaios laboratoriais são o facto de serem mais representativos relativamente às condições do terreno que se pretende estudar, abrangerem volumes de material consideravelmente maiores e ainda considerarem as condições naturais do terreno.

Mesmo tendo em conta todas estas vantagens nunca é de mais salientar que os ensaios “in situ” não possuem a possibilidade de representar todo o conjunto do terreno, havendo por isso a necessidade de ter muito cuidado na interpretação e extrapolação de resultados.

Os ensaios “in situ” podem ser divididos segundo dois tipos. Ensaio de zonamento e ensaios específicos.

Os ensaios de zonamento destinam-se à diferenciação das unidades geotécnicas, permitindo assim um zonamento genérico. Este tipo de ensaio é considerado de fácil e rápida execução, integrando-se o ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) neste grupo.

Os resultados deste tipo de ensaio são interpretados com base em correlações empíricas e semi-empíricas (método directo, os quais não permitem avaliar qualitativamente os

resultados sendo que a confiança neste método provém do número de casos existente e do histórico destes) que têm fundamentação estatística, a partir das quais as medidas de ensaio são correlacionadas directamente com o desempenho de obras geotécnicas tornando assim o tratamento de dados em alguns casos complexo.

Os ensaios específicos formam o segundo tipo de ensaios “in situ”. São ensaios nos quais os parâmetros geotécnicos são avaliados de forma directa. Em geral são ensaios dispendiosos e de execução especializada, e lenta na maioria dos casos, fazendo com que a sua utilização só seja justificada em zonas críticas de solicitação por parte da obra.

Nos ensaios de zonamento engloba-se uma grande quantidade de ensaios utilizados no estudo dos parâmetros geotécnicos. Nomeadamente o SPT, ensaios de penetração dinâmica e ensaios de penetração estática. Por sua vez nos ensaios específicos engloba-se o ensaio de molinete, ensaios pressiométricos, ensaios de carga com placa e ensaios de permeabilidade.

## 1.2. Considerações iniciais

Tal como CAVALCANTE em 2002, o autor desta tese também apela ao devido reconhecimento a PALACIOS, 1977, SCHMERTMANN, 1976, 1978 e SCHMERTMANN & PALACIOS, 1979, que desenvolveram os mecanismos de percepção da dinâmica do SPT. Sem eles, os estudos relacionados com o SPT não estariam tão desenvolvidos. Em Portugal, é inevitável a referência ao Prof. Engenheiro Carlos Rodrigues pelo pioneirismo das medidas de eficiência do SPT em Portugal.

Como é sabido, o SPT é o ensaio “in-situ” mais utilizado em todo o mundo, sendo uma ferramenta fundamental nas investigações das fundações, tendo na sua simplicidade de execução e tempo de resposta, entre outras, as suas grandes qualidades. Assim, é perfeitamente lógica a necessidade de quantificar as perdas de energia, bem como a influência destas no ensaio, com o intuito de obter um maior grau de rigor/exactidão. Tal como disse VELLOSO (1998), *“de nada adianta a utilização dos melhores recursos da*



*electrónica e dos sofisticados programas de cálculo, se os dados de entrada não corresponderem à realidade e estiverem associados a erros”.*

O principal objectivo desta tese é quantificar as perdas de energia no SPT, quais as fontes que geram essas perdas e discutir quais as influências/implicações destas nos resultados do ensaio. Para tal, utilizou-se um sistema de medida de energia que irá ser descrito posteriormente.

A parte experimental desta tese realizou-se, como já foi referido anteriormente, na Guarda, tendo-se analisado 163 golpes, obtidos em seis ensaios, realizados em solo residual granítico.

### **1.3- Subdivisão dos Capítulos**

Esta tese encontra-se dividida em nove capítulos. Sendo:

- CAPÍTULO 1 – Capítulo de introdução da tese, no qual se aborda de uma forma geral os aspectos essenciais desta.
- CAPÍTULO 2 – Descreve o ensaio propriamente dito, incluindo equipamento, modo de execução, vantagens e desvantagens, factores influentes no ensaio, correcções, entre outros.
- CAPÍTULO 3 – Apresenta os vários fundamentos teóricos sobre a transmissão de energia ao longo do ensaio e por consequência as teorias relativas às perdas de energia.
- CAPÍTULO 4 – Descreve o equipamento utilizado na componente pratica desta dissertação.
- CAPÍTULO 5 – Descreve a componente experimental desta tese, incluindo enquadramento geológico da zona ensaiada, equipamento utilizado, entre outros.
- CAPÍTULO 6 – São apresentados os resultados obtidos nos ensaios.

- CAPÍTULO 7 – Apresenta as análises e conclusões relativas aos resultados dos ensaios.
- CAPÍTULO 8 – São apresentadas as principais conclusões desta dissertação.
- CAPÍTULO 9 – Apresenta sugestões para possíveis trabalhos futuros.
- CAPÍTULO 10 – Apresenta a bibliografia utilizada durante a realização da dissertação.

## **2. O ENSAIO SPT**

### **2.1. Considerações iniciais**

O *Standard Penetration Test*, mais conhecido por SPT, é um ensaio in situ muito antigo. O seu aparecimento data de 1902 e surgiu devido à necessidade de padronizar um sistema vulgarmente usado na altura. Actualmente, constitui a investigação mais utilizada na prática corrente da geotecnia, sendo mais frequentemente utilizado na avaliação da capacidade de carga dos terrenos de fundação, e na definição de zonamentos geotécnicos. O ensaio consiste na cravação de um elemento no terreno a fim de avaliar as propriedades mecânicas deste, como por exemplo a sua resistência, sobretudo através da avaliação da compacidade dos solos granulares e da consistência dos solos coesivos. Por ser um ensaio de funcionamento relativamente fácil e de baixo custo, mas também devido à experiência acumulada o SPT é talvez o ensaio mais requerido para o reconhecimento geotécnico de terrenos.

### **2.2. Equipamento**

O ensaio é constituído por um amostrador, um conjunto de varas de aço, um martelo e por fim por um dispositivo de elevação e destravamento que permite erguer o martelo deixando-o cair em queda livre até contactar com o trem de varas.

De seguida serão descritos individualmente os vários elementos constituintes deste ensaio.

### 2.2.1. Amostrador

O amostrador é constituído por três partes. A cabeça (parte superior), o corpo central (parte central), e a boca (parte inferior), tal como se observa na Figura 2.1. Todas as três partes constituintes do amostrador são de aço indeformável. O corpo central possui diâmetro externo igual a  $51 \pm 1$  mm e diâmetro interno de  $35 \pm 1$  mm. O seu comprimento nunca deverá ser inferior a 450 mm. A boca possui o mesmo diâmetro do corpo central, assim como a cabeça, e possui um comprimento de 76 mm, sendo que desses 76 mm 19 constituem o bisel da ponteira de modo a facilitar a penetração, tal como já foi referido anteriormente. Por sua vez, a cabeça apresenta 165 mm de comprimento, sendo este o valor mais usado, já que o mesmo não se encontra definido. Na parte superior desta é enroscada o conjunto de varas que estabelecem a ligação até à superfície do terreno. O peso do amostrador ronda os 6,8 kg, embora seja comum utilizarem-se amostradores mais pesados, tal como foi o caso nos ensaios práticos relativos a esta dissertação como se irá verificar mais adiante. O peso total do equipamento (amostrador, varas e martelo) nunca deverá ser superior à 115 kg (recomendação da ISO 22476-3; EC-7 Part 3).

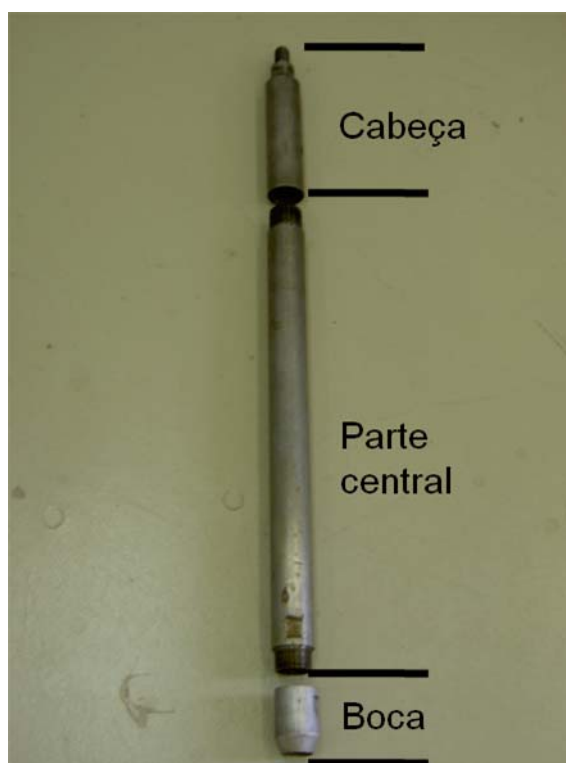


Figura 2.1: Representação das várias partes constituintes do amostrador

### 2.2.2. Varas

As varas, de aço maciço, apresentam diâmetros entre os 40 e 60mm, cujos pesos por metro linear variam entre 4,23 e 10,0 kg (CESTARI, 1990; ISO 22476-3; EC-7 Part 3)

As varas deverão ser periodicamente inspeccionadas, sendo que estas deverão manter uma deflexão sempre inferior a 1 por 200, ou seja, 0,5% (ISO 22476-3; EC-7 Part 3).

De salientar que na vara superior é fixado um batente sobre o qual o martelo irá cair.

### 2.2.3. Dispositivo de queda

O dispositivo de queda é constituído por três partes:

- a) Batente – em aço maciço, deverá possuir uma superfície lisa de modo a garantir a transferência total de energia que chega do martelo e se transmite às varas, e por consequência ao amostrador.
- b) Martelo – também designado por pilão, cuja massa é de  $63,5 \pm 0,5$  kg.
- c) Sistema de elevação do martelo – sistema que eleva o martelo até uma altura de  $760 \pm 10$  mm, sendo que, uma vez atingida essa altura o martelo cai em queda livre (ISO 22476-3; EC-7 Part 3).

A Figura 2.2 ilustra o *lay-out* do ensaio.

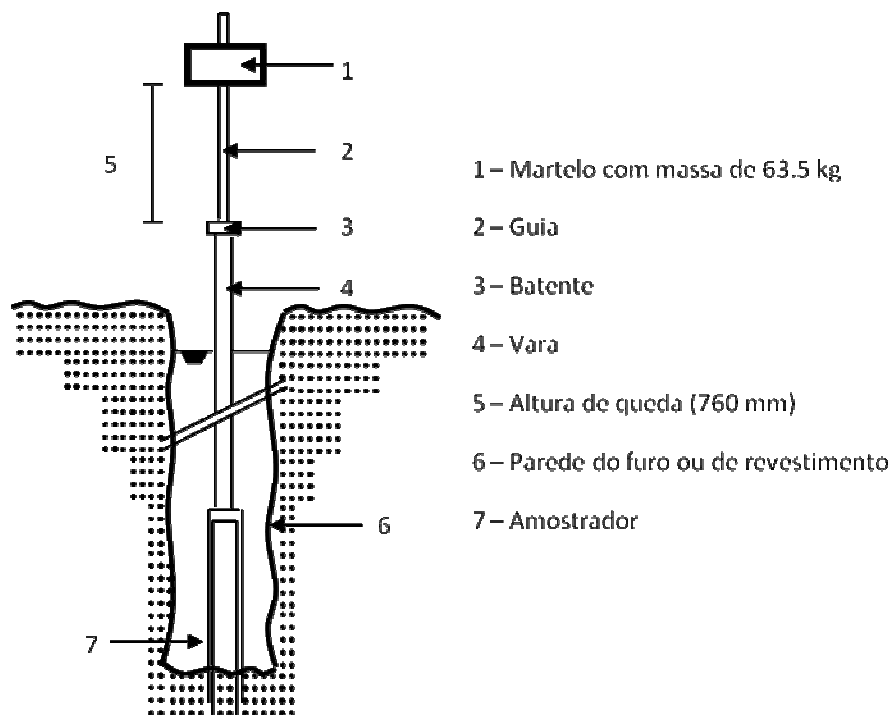


Figura 2.2: Lay-out do ensaio SPT, CESTARI, 1990

Antes de aprofundar as várias características deste ensaio, o autor desta tese considera conveniente abordar alguns aspectos marcantes da história do SPT.

### 2.3. A história do SPT

De acordo com CAVALCANTE (2002) a história do SPT fica marcada pelas quatro grandes fases descritas em seguida.

A primeira com início em 1902 indo até meados dos anos 20. A segunda começando por volta de 1927 termina na fase final da década de 40, entrando-se na terceira fase que se estendeu até aos anos 70 e por fim uma quarta fase que se estende até aos dias de hoje.

Em 1902 o engenheiro CHARLES R.GOW iniciou os processos dinâmicos de cravação em terreno obtendo assim as primeiras amostras associadas a esses processos. (FLETCHER, 1965; BROMS & FLODIM, 1988; TEIXEIRA, 1974;1977). Até essa data, o modo de identificação do solo consistia em aberturas de poços ou de escavações de grande dimensão. Outro método usado era a recolha de detritos por meio de perfurações com circulação de água.

Estes métodos usados à data, provocavam grandes alterações tanto na estrutura como em alguns casos na constituição do solo que se pretendia estudar.

Sendo assim, os processos dinâmicos de cravação introduzidos pelo engenheiro CHARLES R.GOW em 1902 permitiram obter amostras de melhor qualidade, não causando grandes perturbações do solo. Começou assim a ser possível relacionar os resultados obtidos com certos parâmetros geotécnicos através de métodos empíricos ou semi-empíricos.

Contudo, a falta de registos do modo de execução do ensaio dessa época, nomeadamente, a altura de queda do martelo, o peso do martelo, o modo de contagem do número de golpes, etc., limitam seriamente a sua análise (BELINCANTA, 1998).

O início da segunda fase fica marcado pelo aparecimento de um amostrador, cujas características ainda são incorporadas nos amostradores usados hoje em dia em todo o mundo. Esse amostrador, também conhecido por amostrador do tipo Raymond, foi desenvolvido pela Raymond Concrete Pile e a The Gow Company, que se basearam em trabalhos de FLETCHER e HARRY A. MOHR para o construir. Esse amostrador era constituído por três partes (cabeça, corpo central e boca). A principal característica desse amostrador era o facto de o corpo central ser bipartido, o que facilitava imenso a recolha e visualização da amostra adquirida no ensaio. Para tal, bastava desenroscar as duas extremidades do amostrador (cabeça e boca) e separar com algum cuidado as duas partes do corpo central. A qualidade das amostragens ficou muito mais aperfeiçoada com o aparecimento do amostrador, isto porque este preservava grande parte das características naturais dos solos.

Na Figura 2.3 apresenta-se o esquema base do amostrador tipo Raymond.

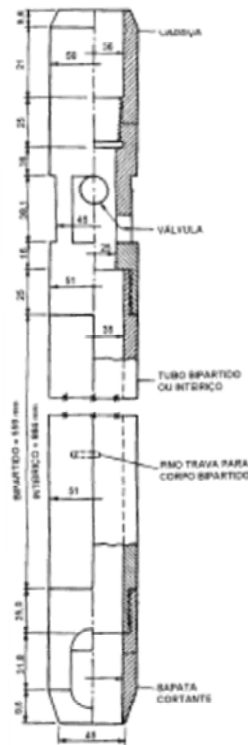


Figura 2.3: Esquema base do amostrador tipo Raymond (HVORSLEV, 1949)

Desde o aparecimento deste amostrador o SPT tem evoluído de forma contínua, sendo que a altura e a forma de queda do martelo, representam as parcelas que mais evoluções sofreram. Tal como já foi referido, os amostradores actualmente usados possuem as características do amostrador do tipo Raymond, facto que do ponto de vista de normalizações é extremamente positivo (CAVALCANTE, 2002).

O início dos anos 30 coincide com o aparecimento das primeiras tentativas, de padronização da cravação do amostrador. Para tal o amostrador era cravado no terreno por acção da queda de um martelo de 0,62 kN. A altura da queda do martelo correspondia a 762mm, sendo que, a resistência do solo à penetração do amostrador seria fornecida pelo número de golpes necessários para cravar o amostrador 304,8 mm (FLETCHER, 1965).



Segundo MOHR (1966) o uso de um martelo de 0,62 kN deveu-se aos pesos usados na altura na região de Boston os quais seriam facilmente levantados até a altura de 762 mm por três homens, auxiliados por uma corda e uma roldana fixa.

Outro ponto marcante da segunda fase da história do SPT corresponde à publicação do livro de TERZAGHI & PECK em 1948. Esse livro aborda os vários aspectos do SPT apresentando inclusivamente as primeiras correlações entre a resistência à penetração e a compacidade das areias, entre outros (BROMS & FLODIN, 1988). Esse livro foi de tal forma revolucionário que a maioria das normas relativas ao SPT actualmente existentes se baseiam nele.

HVORSLEV, em 1949 publicou um trabalho no qual apresenta as correlações entre a resistência à penetração do amostrador e a consistência dos solos, de acordo com vários autores, entre eles TERZAGHI & PECK. Essas correlações encontram-se publicadas em Anexo.

A terceira fase da história do SPT caracteriza-se pelas primeiras tentativas de padronizar o ensaio, já que até a data tal não se verificava, tendo inclusive TERZAGHI ironizado em 1947 com o termo “Standard”.

O primeiro a tentar padronizar o SPT foi JAMES D. PARSON, em 1954. Ele propôs o registo do número de pancadas necessárias para cravar o amostrador para cada um dos três intervalos de 152 em 152 mm (FLETCHER, 1965). No fim deste primeiro passo em direcção à padronização do ensaio surgiram várias discussões sobre qual dos três intervalos medidos seria utilizado como resultado válido do ensaio. JAMES D. PARSON defendeu que o resultado da resistência à penetração do amostrador fosse dada pela menor soma de dois dos três intervalos ensaiados. Já TERZAGHI & PECK (1948) propuseram que o resultado do ensaio seria fornecido pela soma dos dois últimos intervalos ensaiados. O surgimento da primeira norma (ASTM D1586/58T) eliminou por completo a proposta de JAMES D. PARSON. De salientar que essa norma ainda é a que se encontra em utilização hoje dia, embora tenha sido revista inúmeras vezes. Numa das revisões a esta norma (1967), formalizou-se que o primeiro intervalo de cravação (152 mm) correspondia ao intervalo de assentamento do amostrador. Tal conclusão teve como apoio trabalhos de TERZAGHI & PECK (1948); FLETCHER (1965, 1967); LO PINTO (1966); SCHNABEL (1966) e GEISSER (1966). Esses trabalhos demonstram que o

número de golpes necessários para cravar o amostrador nos primeiros 152 mm é inferior comparado com os restantes intervalos de penetração. Tal facto relaciona-se com as perturbações do solo na base do furo, limpeza inadequada do mesmo, ou ainda pelo alívio de tensões devido à retirada da coluna de solo pela perfuração (PALACIOS, 1977).

Com esta questão esclarecida, entrou-se na quarta fase da história do SPT na qual se iniciaram as preocupações com as questões relacionadas com a energia que efectivamente atinge o amostrador e, por consequência, com as perdas de energia no ensaio.

Esta fase fica marcada pelos primeiros trabalhos relacionados com este tema dos quais se destacam os seguintes:

- PALACIOS (1977),
- SCHMERTMANN (1976,1978,1979),
- SCHMERTMANN & PALACIOS (1979),
- KOVACS (1979, 1980, 1981 e 1994),
- KOVACS & SALOMONE (1982 e 1984)
- KOVACS et al. (1977 e 1978).

Esta fase do SPT será abordada com mais detalhe posteriormente.

## **2.4. Execução do ensaio**

O ensaio SPT é um ensaio de execução relativamente fácil, sendo realizado em duas fases. A primeira consiste numa cravação inicial do amostrador, através da queda de um martelo cuja massa é de 63,5 kg de uma altura de 760 mm, até que se atinja um comprimento de 150 mm. Esta primeira cravação tem como objectivo ultrapassar o solo possivelmente perturbado imediatamente abaixo do fundo do furo. O número de pancadas do martelo necessárias para que se atinja uma cravação inicial de 150 mm tem importância meramente informativa, uma vez que, como já se referiu, esta cravação apenas serve para ultrapassar o solo perturbado no decorrer da sondagem. Caso essa

cravação (150 mm) não seja atingida ao fim de 100 pancadas do martelo dá-se o ensaio por terminado. De salientar que caso haja uma penetração significativa do amostrador no solo aquando da sua colocação no fundo do furo esta deverá ser registada. Esta penetração, devido ao peso do sistema (amostrador mais varas) é muito comum em solos muito moles, com pouca resistência. Nestes casos considera-se o valor de  $N_{SPT}$  igual a 1.

A segunda fase do ensaio tem como objectivo uma cravação de 300 mm, sendo que esta fase é realizada em duas partes de 150 mm cada. O resultado do ensaio ( $N_{SPT}$ ) é traduzido pelo número de quedas do martelo necessários para que se atinja esse comprimento de cravação. Caso uma das partes (150 mm) não seja atingida ao fim de 60 pancadas a execução do ensaio é interrompida dando-se então o ensaio por terminado. A profundidade obtida nessa situação (situação de “nega” é registada de modo a poder efectuar uma extrapolação para a profundidade inicialmente pretendida (2 x 150 mm)).

De acordo com a ISO 22476-3;EC-7 Part 3 o ensaio é dado como terminado nos casos em que não se consegue cravar uma das partes de 150 mm ao fim de 50 pancadas, em solos, ou 100 pancadas em rochas brandas.

Por outro lado a norma ASTM D1586-84 recomenda declarar o ensaio como finalizado quando:

- o número de pancadas necessárias para cravar uma das partes de 150 mm é superior a 60;
- 100 pancadas na totalidade dos três trechos de 150 mm cada.
- não se observam penetrações ao fim de 10 pancadas sucessivas.

Os ensaios são acompanhados pela recolha de amostras, sendo comum a sua realização de 1,5 em 1,5 metros ou quando haja uma mudança de unidade geológica, de modo a evitar influência dos ensaios anteriores.

Quando o amostrador é recolhido à superfície, este é aberto ao meio em duas meias canas, permitindo assim o estudo do solo.

## 2.5. Normas

Uma vez que o SPT é considerado um dos mais importantes ensaios “in situ” do mundo é natural que a execução deste seja normalizada, sendo que as normas mais utilizadas para este ensaio são a ASTM D 1586-84, como já foi referido, e o International Reference Test Procedure IRTP/ISSMFE que é uma instituição internacional de referência. Para além destas, existem outros documentos normativos que se passam a citar:

- norma europeia EN ISO 22476-3:2005, “*Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 3: Standard penetration test*”. CEN, Brussels,
- norma Britânica (BS 1377: Part 9, 1990),
- norma Japonesa (JIS-A219, 1976) e
- norma Brasileira (NBR-6484/1980).

Contudo, e uma vez que o ensaio é muito simples, de ponto de vista executivo mas também interpretativo, o número de entidades que passaram a utilizar o ensaio SPT em todo o mundo como ensaio de caracterização geotécnica tem vindo a aumentar ao longo dos tempos. Isso fez e faz com que por um lado, as referências bibliográficas tenham aumentado exponencialmente (devido à grande experiência prática adquirida) originando correlações empíricas com outros parâmetros geotécnicos (SCHMERTMANN, 1970; SCHMERTMANN et al. 1978; AOKI-VELLOSO, 1975; DÉCOURT-QUARESMA, 1978, BURLAND & BURDIDGE, 1985), incluindo identificação e classificação de solos ensaiados (TERZAGHI & PECK, 1948; HVORSLEV, 1949).

Contudo, o aumento do número de entidades a utilizar o SPT não trouxe apenas aspectos positivos. Um pouco por todo o mundo, Portugal incluído, apareceram modificações relativas à execução do ensaio. O caso mais flagrante será mesmo o diâmetro do furo. Inicialmente o ensaio foi previsto para furos de 100 mm sendo que em Portugal é comum realizar-se o ensaio em furos entre os 150 mm e os 200 mm, já que esses diâmetros correspondem aos trados mais usados pelas equipas de furação. Para além das modificações na execução do ensaio também surgiram equipamentos com configurações diferentes das inicialmente estabelecidas sendo que tal facto é justificado por NIXON em 1982 como sendo fruto de cada país possuir eventualmente norma própria

e usar as configurações que lhe convier (CAVALCANTE, 2002). Essas modificações e alterações ao nível de equipamento criaram, e ainda criam, muitos conflitos aquando da comparação de resultados do ensaio entre diferentes entidades, recomendando-se extrema cautela na interpretação sobretudo quando se trata de países diferentes, avaliando sobretudo todos os componentes do ensaio poderão ser diferentes (tipo de furação, tipo de martelo, massa do martelo, altura de queda do martelo, tipo de batente, etc.).

Tal facto fez com que em 1998, BELINCANTA apontasse duas vertentes que poderiam ser seguidas para tornar o SPT um ensaio mundialmente padronizado:

- a) O estabelecimento de norma rígida sem permissão de alterações no equipamento,
- b) A criação de uma norma flexível ou semi-flexível com tentativa de padronização de resultados a partir do estabelecimento de um procedimento de referência.

A primeira alternativa parece muito difícil de ser praticada devido ao grande número de entidades a usar o SPT.

Por sua vez, a segunda alternativa terá mais hipóteses de se impor com maior sucesso em virtude da grande quantidade de equipamentos com as configurações mais diversas. Contudo, nunca se deverá abdicar de um procedimento que seja tomado como referência para os demais (CAVALCANTE, 2002).

## **2.6. Cuidados a observar**

Embora se siga uma norma para a execução correcta do ensaio, geralmente a ASTM D 1586-84, é contudo necessário ter cuidado para que os resultados obtidos sejam válidos. Nomeadamente:

- Antes de se introduzir o amostrador no furo é de importância fundamental a limpeza do mesmo, tendo sempre o cuidado de não perturbar o terreno no qual se pretende realizar o ensaio.
- Aquando da extracção do equipamento do furo este deverá ser retirado de forma passiva e com cuidado de modo a evitar danos no equipamento mas principalmente de modo a evitar que o nível de descompressão seja elevado.
- O furo de sondagem no qual será realizado o ensaio deverá ser feito de modo a não perturbar significativamente o terreno que se pretende estudar. Tendo isto em conta, as sondagens por injeção de água são a evitar uma vez que provocam uma significativa alteração do terreno.
- Durante a execução do ensaio dever-se-á ter o cuidado de não o realizar a uma velocidade demasiada elevada, isto é, o número de quedas do martelo por minuto/hora não deverá exceder um determinado valor. É costume adoptar uma velocidade de ensaio nunca superior a 30 quedas do martelo por minuto.

Mesmo tendo em conta os cuidados referidos anteriormente, a supervisão durante a realização do ensaio assim como a formação da equipa técnica são de uma importância fundamental, uma vez que, caso haja uma falha numa destas situações, os resultados obtidos poderão não ser representativos e/ou confiáveis.

## **2.7. Vantagens e Desvantagens**

Tal como qualquer outro ensaio, o ensaio SPT encerra vantagens e desvantagens.

Como já foi referido, a simplicidade e facilidade do ensaio, a obtenção de um valor numérico de ensaio que pode ser relacionado com regras empíricas de projecto, a recolha de uma amostra e a sua utilização em todo o tipo de solos e rocha branda constituem as suas principais vantagens. Além destas, salienta-se ainda o facto de ser um ensaio difundido em todo o mundo o que permite aceder a imensa bibliografia sobre a interpretação de dados (KULHAWY et al, 1990; SCHNAID, 2000).

Relativamente às desvantagens do SPT pode citar-se o facto de este não simular o tipo de comportamento do terreno mediante solicitação estática, para além dos resultados serem facilmente afectados por factores como por exemplo, o equipamento, modo de execução e profissionalismo do operador (KULHAWY et al, 1990; SCHNAID, 2000).

Tendo visto as principais características do SPT o autor desta tese considera adequado apresentar uma pequena comparação entre o ensaio SPT e alguns dos restantes ensaios de caracterização geotécnica, de modo a facilitar a escolha de um determinado ensaio para um determinado objectivo.

## **2.8. Selecção de ensaios geotécnicos**

Tal como referido anteriormente o SPT permite, através de relações empíricas, obter valores para uma imensa quantidade de parâmetros importantes no estudo geotécnico de um terreno. Desses parâmetros convém salientar a compacidade relativa, ângulo de resistência ao corte, resistência ao corte não-drenada, entre outros, sendo que as correlações entre os resultados do SPT e parâmetros serão apresentados mais adiante. Contudo, estes valores deverão ser encarados como indicadores e não como valores efectivos, devido ao elevado nível de perturbação resultante do tipo de cravação usada, bem como por existir a possibilidade de utilizar correlações estabelecidas para solos que não são exactamente os ensaiados.

De salientar que é extremamente recomendável não se fiar apenas nos resultados dos parâmetros obtidos empiricamente deste ensaio, mas sim, compará-los aos resultados obtidos através de ensaios de laboratório ou outros ensaios de campo. Para além desta comparação, também é recomendável verificar a adequação dos resultados no intervalo de variações admissíveis/normais no solo em estudo.

Tendo isso em conta é fundamental saber escolher que tipo de ensaio se adapta melhor às situações que nos podem surgir. Sendo assim, segue-se um quadro resumo dos vários parâmetros que cada ensaio permite determinar (Quadro 2.1).

Quadro 2.1: Quadro resumo dos vários parâmetros que cada ensaio permite determinar

Grupo		Equipamento	Identificação						Parâmetros						
			Tipo de solo	Perfil	u	Φ'	S <sub>u</sub>	D <sub>r</sub>	m <sub>v</sub>	C <sub>v</sub>	k	G <sub>0</sub>	σ <sub>h</sub>	OCR	σ- ε
Ensaio de penetração	Dinâmicos	Dinâmico (DPs)	C	B	/	C	C	C	/	/	/	C	/	C	/
		Standard Penetration Test (SPT)	A	B	/	C	C	B	/	/	/	C	/	C	/
	Estáticos	CPT Mecânica	B	A/B	/	C	C	B	C	/	/	C	C	C	/
		CPT Eléctrico	B	A	/	C	B	A/B	C	/	/	B	B/C	B	/
		Piezocone (CPTU)	A	A	A	B	B	A/B	B	A/B	B	B	B/C	B	C
		Sísmico (SCPU)	A	A	A	B	A/B	A/B	B	A/B	B	A	B	B	B
		Dilatômetro (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	/	/	B	B	B	C
		Resistividade	B	B	/	B	C	A	C	/	/	/	/	/	/
Outros	Molinete	B	C	/	/	A	/	/	/	/	/	/	B/C	B	
	Ensaio de placa	C	/	/	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	

Aplicabilidade e uso de ensaios "in situ" (LUNNE et al., 1997)

Legenda:

A – alta aplicabilidade,

B – moderada aplicabilidade

C – baixa aplicabilidade,

/ – Inexistente

u – poro pressão "in situ"

 $\Phi'$  – ângulo efectivo de resistência ao corte $S_u$  – resistência ao corte não-drenada $D_r$  – densidade relativa $m_v$  – coeficiente de compressibilidade volumétrica $C_v$  – coeficiente de consolidação

k – coeficiente de permeabilidade

 $\sigma_h$  – tensão horizontal $G_0$  – modulo de distorção a pequenas deformações $\sigma - \varepsilon$  – relação tensão-deformação

OCR – grau de sobreconsolidação



## 2.9. Factores que influenciam os resultados do SPT

Os principais factores que influenciam os resultados do ensaio podem ser classificados como sendo de natureza humana, do próprio equipamento e/ou do procedimento de execução. FLETCHER em 1965 publicou uma lista dos principais factores de influência, conforme apresentado em seguida:

- Limpeza inadequada do furo de sondagem. A deficiente limpeza do fundo do furo poderá aumentar ou diminuir o número de pancadas necessárias para cravar o amostrador, isto devido ou, a permanência ou então a demasiada remoção dos resíduos que poderão permanecer no fundo do furo aquando do início do ensaio.

- Diâmetro do furo. Tal como já foi referido anteriormente, o diâmetro do furo influencia os resultados do ensaio, uma vez que quanto maior for o diâmetro do furo, maior será a perturbação provocada no fundo do furo, quanto mais não seja pela alteração do estado de tensão.

- Tipo de martelo. Cada martelo possui características próprias (peso, área, constituição, etc.) que podem diminuir ou aumentar as perdas de energia do sistema, sendo que SHI-MING (1982), IWASAKI et al., (1982), CLAYTON (1990), KOVACS (1994) e CAVALCANTE (2002) publicaram excelentes trabalhos acerca deste tema, focando-se principalmente nos martelos de queda livre, que correspondem ao tipo de martelos usados em Portugal. No Quadro 2.2 apresenta-se um resumo retirado de CAVALCANTE (2002) dos vários tipos de martelos usados assim como as suas referências.

Quadro 2.2: Quadro resumo das várias características dos tipos de martelos usados no mundo. Retirado de CAVALCANTE (2002)

País	Martelo	Mecanismo	Eficiência média (%)	Referência
Argentina	Donut	Cathead	45	A
Brasil	Pino – guia	Manual	72 – 73	C; F
China	Automático	Queda livre	60	A
	Donut	Manual	55	B
	Donut	Cathead	50	A
Colômbia	Donut	Cathead	50	C
Japão	Donut	Tombi	78 – 85	A; D
	Donut	Duas voltas no cathead	65 – 67	A; B
Inglaterra	Automático	Queda livre	73	E
Estados Unidos	Safety	Duas voltas no cathead	55 – 60	A; B
	Donut	Duas voltas no cathead	45	A
Venezuela	Donut	Cathead	43	C

Autores: A) SEED et al. (1985); B) SKEMPTON (1986); C) DÉCOURT (1989); D) RIGGS (1986); E) CLAYTON (1990); F) BELINCANTA (1988).

– Altura de queda do martelo. Estudos realizados demonstram que um erro de +/- 7,5 cm na altura de queda pode induzir a erros na energia total transmitida as varas da ordem de +/- 10%, De MELLO (1971). Contudo é importante referir que esse estudo se referia aos ensaios com accionamento manual e que esses já se encontram em desuso em Portugal.

– Frequência dos golpes. Mais uma vez estudos realizados demonstram que a frequência de golpes aumenta a altura de queda do martelo. Não sendo aconselhados por certos autores uma frequência de golpe maior do que 30 golpes por minuto (DÉCOURT et al., 1988; ISSMFE, 1989). Isto mais uma vez para ensaios com accionamento manual, já em desuso em Portugal.

– Comprimento e tipo das varas. O comprimento das varas é um dos factores que mais influencia o valor de  $N_{SPT}$  já que a questão da influência do equipamento

relaciona-se com a energia transferida ao amostrador no processo de cravação. Por outro lado o aumento do comprimento das varas aumenta o risco de deflexão lateral das varas influenciando os resultados do ensaio. Além disso, o mesmo aumento do comprimento das varas resulta também num aumento do peso que incide sobre o amostrador, aumentando assim a força da cravação, CAVALCANTE, (2002).

CAVALCANTE em 2002 realizou um trabalho profundo sobre os factores de influência recomendando-se a sua leitura para aprofundar o tema.

No Quadro 2.3 apresenta-se uma síntese dos factores de influência.

Quadro 2.3: Quadro resumo dos vários factores que podem afectar os resultados do SPT, segundo CAVALCANTE (2002)

<b>Causas</b>	<b>Efeito</b>	<b>Influência no valor de N</b>
Limpeza do furo inadequada	O ensaio não é realizado sobre o solo natural	Aumenta ou diminui
Não manutenção do nível adequado da água no furo	Instabilidade do fundo do furo	Diminui
Altura de queda inadequada	Energia vária	Aumenta ou diminui
Massa do martelo inadequada	Energia vária	Aumenta ou diminui
Sistema de golpeio excêntrico	Redução de energia	Aumenta
Queda do martelo condicionada	Redução de energia	Aumenta
Ensaio iniciado acima do pé do revestimento	Amostrador cravado em solo adensado artificialmente	Aumenta muito significativamente
Pouco cuidado na leitura de N	Resultados pouco precisos	Aumenta ou diminui
Utilização de amostradores não padronizados	Correlações não válidas	Aumenta ou diminui
Solos cascalhentos	Amostrador obturado e/ou encravado	Aumenta
Utilização de varas flexíveis	Transmissão da energia ao amostrador deficiente	Aumenta

KULHAWY & MAYNE (1990)

Todos estes factores influenciam os resultados do SPT fazendo com que a eficiência do ensaio não seja total. A eficiência depende das perdas devido ao atrito e claro à própria dinâmica de transmissão da energia do conjunto. Ora, para que a energia transmitida às varas ( $E_r$ ) seja totalmente transmitida é necessário que o peso das varas iguale o peso do martelo. Como tal não sucede, como se irá verificar mais adiante, normalizou-se um valor de  $E_r$  igual a 60% da energia potencial correspondendo a uma eficiência de 60%. Calculando-se então o valor de  $N_{SPT}$  para  $N_{(60)}$  através da expressão (2.1) que considera que o valor real do  $N_{SPT}$  ( $N_{(60)}$ ) corresponde a razão entre a energia medida ( $E_{medida}$ ) e 60% da energia teoricamente disponível ( $E_{60\%}$ ), isto multiplicando pelo numero de pancadas obtidos no ensaio ( $N_{medido}$ ).

$$N_{60} = \frac{E_{medida}}{E_{60\%}} \times N_{medido} \quad (2.1)$$

Este valor de 60% foi estabelecido com base em vários trabalhos relativos à questão da eficácia do ensaio, entre eles, os de TERZAGHI (1948) e SCHMERTMANN E PALACIOS (1979) entre outros. Contudo, deve-se salientar que o valor de  $N$  medido deverá ser o correspondente a energia de referência e não a energia medida. Para tal deveser usada a expressão 2.2.

$$N' \times E' = E'' \times N'' \quad (2.2)$$

onde  $N'$  representa o valor de  $N_{SPT}$  e  $E'$  a energia medida. Por sua vez,  $E''$  representa a energia de referência e  $N''$  o valor de  $N_{SPT}$  relativo a esta.

## 2.10. Correções dos resultados

Tendo em vista as principais características do SPT, considera-se conveniente quantificar a influência das várias metodologias de execução do ensaio nas correlações obtidas entre os parâmetros geotécnicos e os valores de  $N_{SPT}$  obtidos ao longo do ensaio.

Sendo assim, e tendo em conta que o comprimento das varas, o diâmetro do furo e o tipo de amostrador utilizado, condicionam os resultados do ensaio, torna-se então necessário corrigir esses valores. Para tal recomenda-se o uso da expressão 2.3.

$$N_{60} = N \times C_B \times C_R \times C_S \quad (2.3)$$

onde  $C_B$  representa o factor correctivo do comprimento das varas,  $C_R$  o factor correctivo do diâmetro do furo e  $C_S$  o factor correctivo do amostrador, sendo que os valores desses factores de correcções se encontram no Quadro 2.4.

Quadro 2.4: Valores dos vários factores de correcção de acordo com as características do equipamento utilizado

<b>Comprimento das varas</b>	<b><math>C_B</math></b>
> 10 m	1,00
6 – 10 m	0,95
4 – 6 m	0,85
3 – 4 m	0,75
<b>Diâmetro do furo</b>	<b><math>C_R</math></b>
65 – 115 mm	1,00
150 mm	1,05
200 mm	1,15
<b>Amostrador</b>	<b><math>C_S</math></b>
Sem liner	1,00
Com liner em areias densas e argilas	0,80
Com liner em areias soltas	0,90

SKEMPTON (1986).

Por outro lado, em solos arenosos é indispensável ter em conta o efeito do nível de tensões efectivas à profundidade do ensaio, sobretudo pela importância que tem na definição da resistência. Tendo isso em conta, estabeleceu-se o conceito de  $(N_1)_{60}$ , que representa o resultado que se obteria com um dado sistema num dado solo para uma tensão efectiva vertical de repouso  $(\sigma'_{v0}) = 100 \text{ kPa}$ .

Sendo assim, torna-se indispensável introduzir um novo factor correctivo  $C_N$ , como se observa na expressão 2.4.

$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60} \quad (2.4)$$

onde  $(N_1)_{60}$  representa o resultado do ensaio corrigido e normalizado para uma tensão efectiva vertical de 100 kPa.

O parâmetro  $C_N$ , representa um factor de correcção que depende da tensão efectiva vertical  $(\sigma'_{v0})$ . A sua determinação pode ser feita de duas maneiras. A primeira através da expressão 2.4, (CESTARI, 1990).

$$C_N = \frac{1}{\sigma'^{(n)}_{v0}} \quad (2.5)$$

O valor de  $(n)$  depende de autor para autor, sendo que provavelmente o mais utilizado é 0,5, proposto por LIAO & WHITMAN (1985).

A segunda possibilidade para determinar o valor de  $C_N$  é através de um ábaco apresentado por TOKIMATSU em 1988 (Figura 2.4).

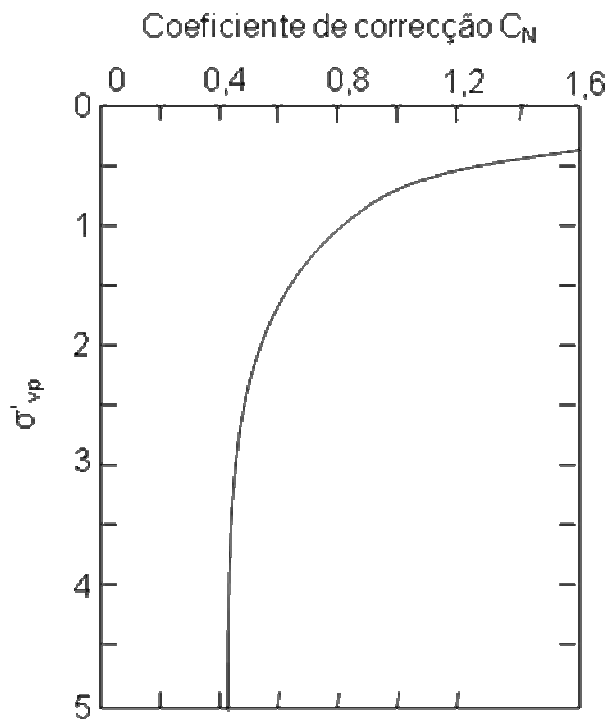


Figura 2.4: Ábaco relativo ao factor de correcção  $C_N$  apresentado por TOKIMATSU, 1988. Retirado de CESTARI, 1990

## 2.11. Correlações entre parâmetros geotécnicos

Tal como referido anteriormente, os parâmetros geotécnicos que habitualmente mais se correlacionam com os resultados do SPT são a compactidade, ângulo de atrito em solos arenosos e consistência e resistência ao corte não drenada em solos argilosos (WELTMAN & HEAD, 1983; BONCHERE, 1991; FOLQUE, 1992). Mais uma vez se chama a atenção para o aconselhamento de encarar essas correlações como qualitativas e não tanto como quantitativas, isto devido ao elevado nível de perturbação, resultante do tipo de cravação adoptado, tornando-as assim, demasiadas grosseiras.

Para além das correlações já referidas existem ainda outras, estando estas associadas a parâmetros de deformabilidade. Contudo, e uma vez que o ensaio não possui sensibilidade suficiente para a avaliação desses parâmetros, considera-se essas

correlações demasiado abusivas/exageradas. JOHNSTON em 1983 evidenciou, que o ensaio SPT consistia num ensaio de resistência, o qual solicita o solo para um estado de rotura. Dai, qualquer correlação com a deformabilidade do solo obriga-nos a assumir uma relação constante entre esta e a resistência, o que do ponto de vista desse autor, conduz a desvios acentuados em relação à situação real.

### 2.11.1. Solos arenosos

O Quadro 2.5 retirado de SKEMPTON (1986), apresenta as correlações mais usadas entre a compacidade dos solos arenosos e os valores do ensaio, mas também as correlações entre este e a densidade relativa ( $D_r$ ).

Quadro 2.5: Correlações entre a compacidade dos solos arenosos com os valores do SPT assim como da densidade relativa

$N_{1(60)}$	0 - 3	3 - 8	8 - 25	25 - 42	> 42
$D_r$ (%)	0 - 15	15 - 35	35 - 65	65 - 85	85 - 100
Compacidade	Muito solta	Solta	Mediamente compacta	Compacta	Muito compacta

SKEMPTON (1986)

Contudo, existem outras correlações entre a compacidade relativa e os valores do SPT, nomeadamente os ábacos apresentados por GIBBS & HOLTZ e, 1957 e HOLTZ and GIBBS em 1979 (Figura 2.5).



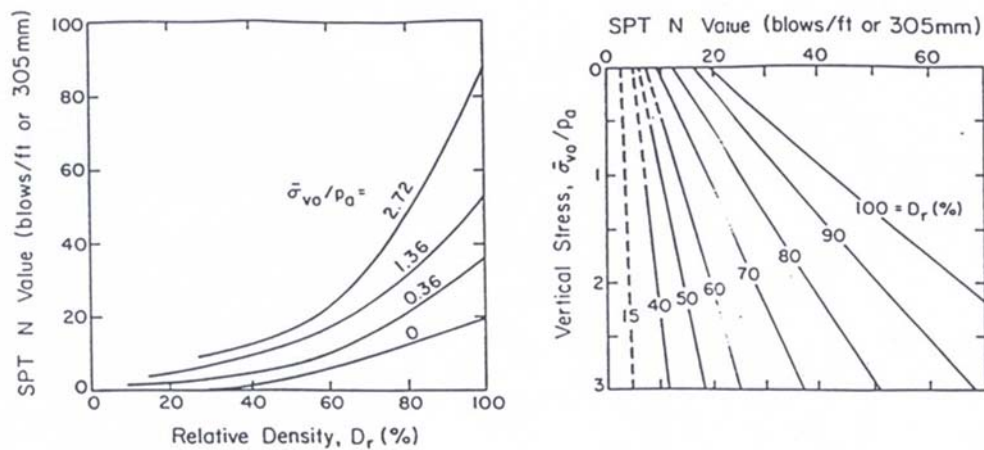


Figura 2.5: Correlações entre os valores do SPT e a densidade relativa (GIBBS & HOLTZ, 1957; HOLTZ and GIBBS, 1979)

Quanto ao ângulo de resistência ao corte ( $\phi'$ ), em solos arenosos, este pode ser determinado directamente (Figura 2.6) ou então através da densidade relativa (Figura 2.7).

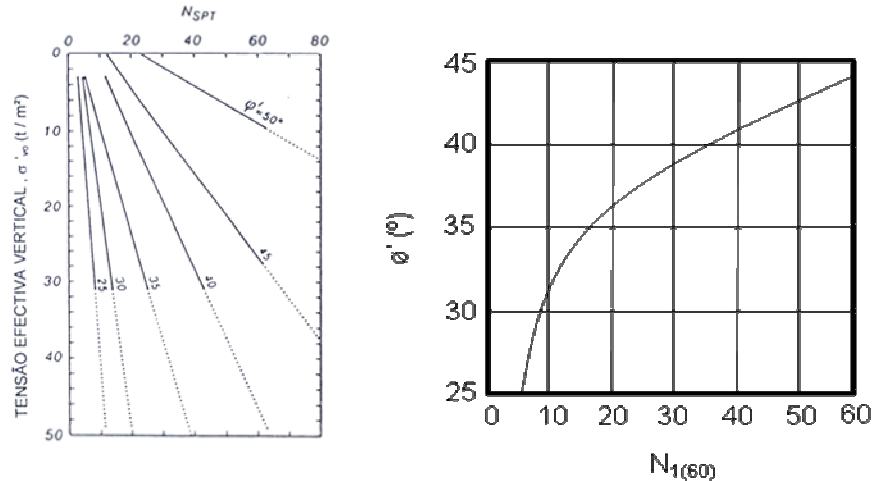


Figura 2.6: Ângulo de atrito em função dos valores do SPT, DE MELLO (1971) e DÉCOURT (1989) respectivamente

Usando os diagramas de SCHMERTMANN (1978) e WINTERKORN & FRANG (1975) (Figura 2.7) é possível determinar-se o valor do ângulo de atrito, sabendo o valor da densidade relativa.

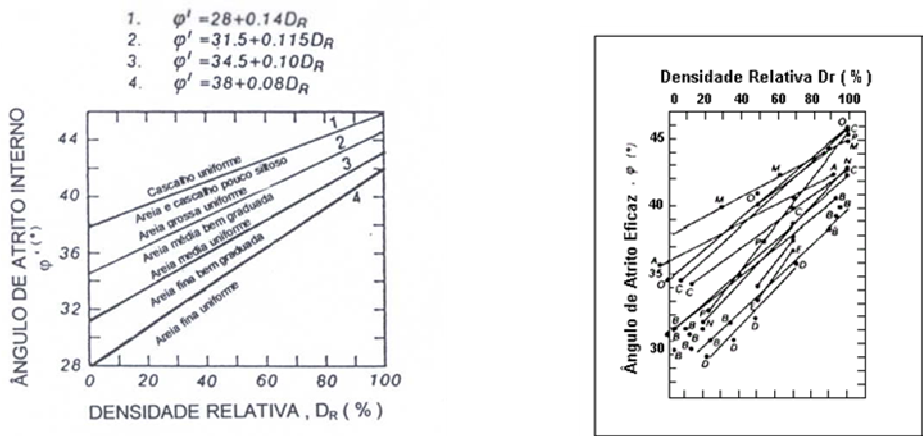


Figura 2.7: Ângulo de atrito em função da densidade relativa, SCHMERTMANN (1977) e WINTERKORN & FANG (1975) respectivamente

2.11.2. Solos argilosos

O Quadro 2.6, retirado de PECK, HANSON & THORNBURN (1974), apresenta as correlações mais usadas entre a consistência dos solos argilosos e os valores do ensaio.

Quadro 2.6: Correlações entre a consistência e dos solos argilosos com os valores do SPT, PECK, HANSON & THORNBURN (1974)

N <sub>(60)</sub>	0 - 2	2 - 4	4 - 8	8 - 15	15 - 30	> 30
Consistência	Muito mole	Mole	Mediamente consistente	Dura	Muito dura	Rija

Relativamente a resistência ao corte não drenada, esta é determinada com base no ábaco (Figura 2.8) apresentado em NAV – FAC DESIGN MANUAL (1982). Esses resultados são apresentados tendo em conta o efeito da plasticidade.

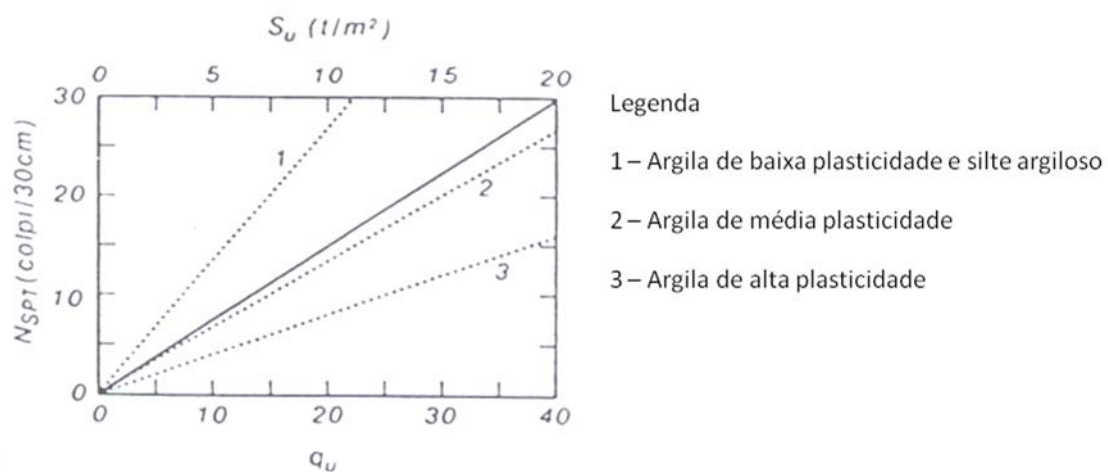


Figura 2.8: Resistência ao corte não drenada em argilas saturadas (NAV-FAC Design Manual, 1982)

### 3. MEDIDAS DE ENERGIA DE ENSAIO NO SPT

#### 3.1. Considerações iniciais

*“Deve-se considerar que a energia nominal transferida ao amostrador, no processo de cravação, não é a energia de queda livre teórica transmitida pelo martelo”. (e.g. SCHMERTMANN & PALACIOS, 1979; SEED e outros, 1985; SKEMPTON, 1986)*

Com base nos registos existentes, as primeiras medidas de energia no SPT datam do final dos anos 70. Desde dessa data que se tem assistido a uma evolução contínua desse assunto, sendo que actualmente se consegue avaliar a eficiência do ensaio com um elevado grau de rigor, CAVALCANTE (2002). No panorama nacional, as primeiras medidas datam de 2008, realizadas por RODRIGUES.

Contudo, este assunto é ainda hoje considerado um dos assuntos mais problemáticos associado ao SPT. Sendo assim, o autor desta tese considera apropriado referenciar e caracterizar os vários tipos de energia existentes no ensaio.

#### 3.2. Energia potencial gravítica

Estando o martelo em repouso pronto a ser libertado, e por conseguinte em condições de iniciar o ensaio, este possui uma energia denominada energia potencial gravítica. Esta energia, designada por  $E^*$ , ou ainda segundo alguns autores por  $E_T$ , é resultado da multiplicação da massa do martelo pela força da gravidade e a altura a que o martelo se encontra (esta altura diz respeito a altura do martelo em relação ao batente, e não à superfície do terreno, conforme muitos poderão pensar). Esta multiplicação pode ser

representada pela seguinte equação  $E^* = m \times g \times h$ , onde  $m$  representa a massa do martelo,  $g$  a força gravítica e  $h$  a altura a que o martelo se encontra, que corresponde teoricamente à altura de queda do ensaio. Tomando os valores designados pela ASTM D 1586-84, a energia potencial gravítica do ensaio SPT deverá ser 474,7 Joules, em resultado da massa do martelo (63,5 kg) e da altura de queda (762 mm), sendo que a força gravítica mantém sempre o mesmo valor (9,81 N).

Tal como qualquer outro equipamento de impacto, o martelo sofre desgaste ao longo do tempo, devido às inúmeras pancadas efectuadas. Tendo isso em conta, é imprescindível verificar periodicamente qual o peso real do martelo e não confiar apenas no valor fornecido pelo seu fabricante. A título de exemplo, caso a massa do martelo não seja 63,5 kg mas sim 63,2 kg, devido aos desgastes sofridos por este, a energia potencial gravítica do martelo passará de 474,7 Joules para 472,4 Joules, o que do ponto de vista dos cálculos relativos a eficácia do ensaio trará grandes diferenças, como se irá verificar mais adiante.

Do ponto de vista da altura de queda do martelo esta também deverá ser controlada, tal como foi o caso do ensaio prático desta tese e que será descrito posteriormente. Contudo, e seguindo o raciocínio anterior, considera-se oportuno exemplificar a influência da altura de queda do martelo. Desse modo, caso a altura de queda não seja os 762 mm, mas sim por exemplo 752 mm a energia potencial gravítica passará de 474,7J para 468,4 Joules. Ou seja, uma diferença de apenas 1cm na altura de queda do martelo provoca uma diferença de energia superior a 6 Joules. Esta diminuição da altura de queda do martelo poderá ser causada por uma diminuição do número de pancadas por minuto, já que, KOVACS em 1979 apresentou dados (Figura 3.1) nos quais o aumento do número de pancadas por minuto aumentava a altura de queda do martelo e vice-versa. Contudo, convém salientar que estas conclusões se aplicam aos ensaios com accionamento manual, estando esses já extintos em Portugal. Para concluir esta sequência de exemplos, conjugando a diferença na massa do martelo com a diferença na altura de queda do martelo a energia potencial gravítica passará de 474,7 Joules para 466,2 ou seja, uma diferença de energia superior a 8 Joules.

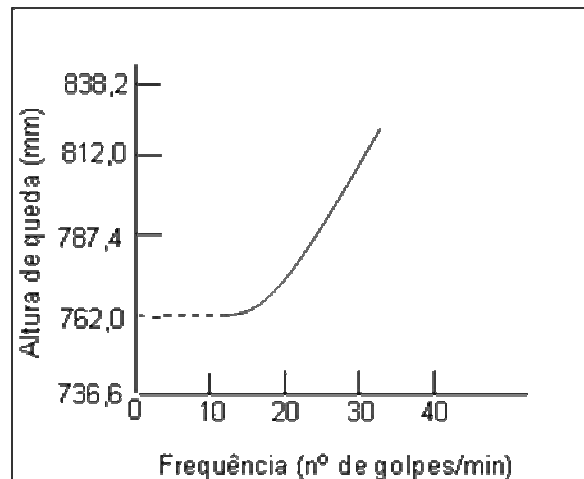


Figura 3.1: Altura de queda vs velocidade de golpes (KOVACS, 1979)

### 3.3. Energia cinética existente aquando do impacto

#### 3.3.1. Energia cinética teórica

Teoricamente a energia potencial gravítica do martelo ( $E^*$ ) deveria ser transformada, na sua totalidade, em energia cinética ( $E_c$ ). Ora, devido às perdas de energia, tal não se verifica, sendo que a energia cinética antes do impacto é inferior à energia potencial gravítica. Só a título de exemplo, e considerando os valores recomendados pela norma, em considerações ideais a energia cinética antes do impacto (3.1) seria 474,7 Joules e por consequência a velocidade da queda do martelo (3.2) seria 3,87 m/s, já que

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (3.1)$$

e por conseguinte

$$v = (2 \times g \times h)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2).$$

Na realidade, e devido as perdas de energia existentes, este valor não corresponde à realidade, tal como se irá verificar mais adiante. Essas perdas de energia são

principalmente causadas pelo atrito existente entre o martelo e o sistema de queda deste, TOKIMATSU (1988).

Mais uma vez, convém salientar que erros nas medidas do peso do martelo e/ou na altura de queda influenciam significativamente o valor da energia potencial gravítica prevista para o equipamento e por consequente a energia cinética teórica e a velocidade de queda do martelo, parâmetros fundamentais na determinação da eficiência do ensaio.

DÉCOURT (1989) atribuiu o nome de factor de eficiência  $e_1$  ao factor que relaciona a energia cinética teórica à energia medida imediatamente antes do impacto entre o martelo e o batente. Este factor de eficiência corresponde à razão entre a energia realmente disponível ( $E_M$ ) (ou seja, a real) e a energia teoricamente disponível ( $E_T$ ). Tal como se observa na expressão 3.3.

$$e_1 = \frac{E_T}{E_M} \quad (3.3)$$

Muitos autores consideram este factor de eficiência como sendo o primeiro factor indicativo de perdas de energia do ensaio, (CAVALCANTE, 2002).

Estando ainda relacionado com este tema, o autor desta tese considera adequado fazer uma referência aos métodos existentes para a determinação da velocidade da queda do martelo.

### 3.3.2. Energia cinética real

Tal como já foi referido, e com base nos registos disponíveis, desde do final dos anos 70 que são realizadas medições, ou em alguns casos tentativas de medição, da velocidade da queda do martelo (KOVACS et al., 1981; KOVACS & SALOMONE, 1982; MATSUMOTO et al., 1992; MORGANO & LIANG, 1992; ABOU-MATAR & GOBLE, 1997).

Os sistemas empregues desde então para realizar essas medidas têm vindo a sofrer uma evolução notável. As primeiras medidas foram realizadas por um sistema pouco convencional e pouco preciso, nomeadamente com a ajuda de um cronómetro de bolso (KOVACS et al. 1975). Passados uns anos apareceram os primeiros *scanners* que foram

utilizados nas medições da velocidade, que permitiam captar e registar os trajectos luminosos colocados no martelo. (KOVACS et al., 1981; KOVACS & SALOMONE, 1982). De seguida utilizou-se o método de criação de uma corrente eléctrica que seria activada aquando da passagem do martelo por um dos fios da corrente e desligada aquando da passagem do martelo pelo outro fio. Como era conhecida a distância entre os fios e o tempo que a corrente eléctrica esteve ligada era possível calcular qual a velocidade da queda do martelo (MATSUMOTO et al., 1992). Já nos últimos anos tem-se recorrido muito ao uso de radares com sistemas de registos que permitem medir com bastante rigor a velocidade da queda do martelo. Esses radares baseiam-se no efeito “DOPLER” (MORGANO & LIANG, 1992; ABOU-MATAR & GOBLE, 1997).

Relativamente ao ensaio prático desta tese, a descrição do método usado para a determinação da energia cinética será feita mais adiante.

### **3.4. Energia transferida ao batente do ensaio**

Outro aspecto muito importante no ensaio é a energia transferida ao batente e por conseguinte a propagação da onda de impacto que chega até ao amostrador.

O impacto do martelo no batente do ensaio corresponde a outro factor de perda de energia do ensaio (SCHMERTMANN, 1976 e 1978; PALACIOS, 1977; SCHMERTMANN & PALACIOS. 1979).

Durante o impacto do martelo com o batente, é gerada uma onda de tensão que se propaga pelas varas, chegando ao amostrador. Segundo CAVALCANTE (2002) apenas a teoria Newtoniana de impactos entre corpos rígidos não reproduz, de maneira rigorosa, as condições sob as quais o evento ocorre, já que se trata de um impacto dinâmico. A interface martelo - batente tem um papel fundamental na propagação da energia para as varas, com efeito, um mau contacto, devido a sujidade, falha na horizontalidade do batente, ou outras, poderão provocar uma perda significativa da energia, (CAVALCANTE,



2002). De modo a ter uma melhor perspectiva sobre este tema o autor desta tese aconselha a consulta dos trabalhos de PALACIOS (1977) e SCHMERTMANN & PALACIOS (1979), que inclusivamente são considerados marcos de referência na descrição do comportamento dinâmico do ensaio SPT.

Relativamente a este aspecto, são considerados dois grandes factores responsáveis pelas perdas de energia. Um factor relaciona-se com a massa do batente e outro relaciona-se com o comprimento do trem de varas usado no ensaio.

Em relação ao primeiro, DÉCOURT (1989) atribuiu o nome de factor de eficiência  $e_2$  e verificou que a massa do batente e o factor de eficiência  $e_2$  são inversamente proporcionais, isto é, quanto maior a massa do batente menor o valor de  $e_2$  e por consequência menor será a eficiência do sistema.

Por sua vez, ao segundo factor DÉCOURT (1989) atribuiu-lhe o nome de factor de eficiência  $e_3$ , sendo que este factor o mais problemático e controverso.

Para melhor compreensão do tema, aconselha-se vivamente a consulta de três trabalhos de grande qualidade relativos a este problemático assunto (FAIRHURST, 1961; PALACIOS, 1977, SCHMERTMANN & PALACIOS, 1979; YOKEL, 1982), cujas conclusões se apresentam em seguida:

- Em 1961 FAIRHURST demonstrou que a onda desenvolvida na vara possui forma de degraus, no qual cada degrau corresponde a um valor  $\rho_p$  espaçado de intervalos de tempo de  $2L/c$  onde  $\rho_p$  representa a massa específica da vara,  $L$  o comprimento do martelo e  $c$  a velocidade de propagação de impulsos de tensão.

Também demonstrou que em casos de trem de varas compridos a energia é transferida em quase toda a sua totalidade a partir de qualquer martelo. Em casos de trem de varas curtos a quantidade de energia transferida dependerá de  $n$ , correspondendo  $n$  à quantidade de pulsos de tensão no martelo.

- Por sua vez, PALACIOS (1977) e SCHMERTNANN & PALACIOS (1979) demonstram que a onda de compressão inicial no trem de varas é reflectida quando esta chega ao amostrador, retornando assim, como uma onda de tracção. Quando esta atinge a interface martelo – trem de varas, no tempo  $2l/c$ , onde  $l$  corresponde ao comprimento total do trem de varas e  $c$  a velocidade de impulso de propagação de impulsos de tensão, o valor da tensão de tracção excede a tensão de compressão existente na interface martelo – trem de varas, fazendo com que este seja puxado para baixo separando-se momentaneamente do martelo. A este momento estes autores deram o nome de “tension cutoff”. Nesse momento a transferência de energia do martelo para o trem de varas é interrompido. Contudo no fim do tempo de “tension cutoff” o martelo volta a estar em contacto com o trem de varas, havendo novamente transferência de energia e provocando um segundo impacto entre o martelo e o trem de varas. Porém, estes autores defendem que esses impactos subsequentes ao primeiro não contribuem de modo significativo para a penetração do amostrador, uma vez que estes ocorrem muito tardiamente.

Para além disso, PALACIOS & SCHMERTMANN (1979) demonstraram que a energia transferida ao trem de varas aumenta com o seu comprimento, sendo que, para os resultados obtidos por estes, a eficiência atinge o seu valor máximo quando o comprimento do trem de varas ultrapassa os 12 metros. Contudo, actualmente não se poderá fiar neste valor uma vez que os métodos, assim como os equipamentos, utilizados nessa altura eram diferentes dos utilizados hoje em dia, e conforme já verificado anteriormente, esses aspectos influenciam os resultados do ensaio.

- Por seu turno, YOKEL (1982) provou que 95% da energia do martelo é transmitida ao trem de varas quando este possui uma massa correspondente à 75% da massa do martelo.

Para finalizar este assunto o autor desta tese considera apropriado referir que a norma mais utilizada em Portugal (ASTM D1586/58T) não especifica qual a geometria padrão do batente. No ensaio prático relativo a esta tese foram usados dois batentes com geometria diferente. Este assunto será aprofundado e analisado mais adiante.

### 3.5. Energia transferida ao Amostrador

A compreensão do assunto da energia transferida ao Amostrador pode dividir-se em duas partes fundamentais. A primeira, que diz respeito à propagação das ondas aquando do impacto, está extremamente bem relatado no trabalho de YOKEL datado de 1989. Nesse trabalho, YOKEL aborda os vários aspectos importantes da propagação das ondas em impactos dinâmicos, pelo que o autor da presente tese não considera necessário introduzir nesta tese esses princípios teóricos, mas apenas apresentar as suas principais conclusões.

YOKEL realizou uma análise dos ciclos gerados pela onda de compressão gerada no topo do trem de varas que atingem o amostrador. Dessa análise, YOKEL afirma que por cada incremento de cravação do amostrador a força da onda de compressão é diminuída de  $F_s$ , onde  $F_s$  corresponde à força exercida pelo solo no amostrador. Para além disso, YOKEL concluiu que o aumento da resistência à penetração diminui a energia do impacto do martelo, mas também que, em solos de baixa resistência, torna-se necessário a ocorrência de vários ciclos de penetração para que a totalidade da energia seja transferida ao amostrador. O inverso observa-se em solos de grande resistência nos quais apenas um ciclo de penetração é necessário.

A segunda parte fundamental para a compreensão da energia transferida ao Amostrador diz respeito ao comprimento das varas utilizadas no ensaio.

Actualmente existem dois métodos para a determinação da energia realmente transferida às varas do SPT. O primeiro, designado por EFV, representa a energia medida com base em valores de força e velocidade. Este método só pode ser usado caso se tenha um sistema de medição de força e de velocidades (por exemplo uma célula de carga e um acelerómetro, respectivamente). O segundo método, é designado por EF2 e representa a energia medida apenas com base em valores de força. Neste caso, apenas será necessário um medidor de força já que a energia será calculada a partir da multiplicação ao quadrado da força registada. Convém salientar que tanto num método como noutro os medidores de força e de velocidade (por método EFV) deverão ser colocados numa zona próxima do topo da vara mais à superfície. Uma vez que, nem sempre se dispõe das

medidas de velocidade do ensaio o método EF2 é o mais utilizado, embora o método EFV seja mais aconselhável por garantir um rigor maior dos dados (CAMPANELLA & SY, 1994; ABOU-MATAR & GOBLE, 1997). Contudo, é conveniente salientar que em Portugal o não uso de acelerómetros é quase inexistente. Logo, o uso do método EF2 tem sido cada vez menos utilizado.

Esta possibilidade de se poder usar qualquer um dos dois métodos, deve-se ao facto de existir uma grande proporcionalidade entre a força e a velocidade (expressões 3.4 e 3.5).

$$F = m \times a \quad (3.4)$$

$$a = \frac{v}{t} \quad (3.5)$$

Contudo, tal proporcionalidade só é completa até ao primeiro impacto do martelo, não se verificando essa proporcionalidade a partir daí. Esta propriedade foi demonstrada por PALACIOS & SCHMERTMANN em 1979, que também concluíram que a energia adicional, resultante dos impactos subsequentes, não aumentaria significativamente a penetração do amostrador (CAVALCANTE, 2002).

Sendo assim, convém relembrar que o método preferencialmente usado deverá ser o EFV, que representa a parte da energia potencial (inicialmente disponível) que realiza o trabalho no sistema vara - amostrador e cuja metodologia é recomendada pela norma ASTM D1586/58T, superando as limitações inerentes ao método EF2.

Embora seja possível recorrer ao método EF2 em vez do EFV, muitos autores (incluindo o desta tese) recomendam plenamente o uso do método EFV, uma vez que os acelerómetros actualmente disponíveis fornecem valores muito precisos, aumentando assim o grau de precisão da medição da energia transmitida às varas e por consequência ao amostrador ao contrário dos usados por SCHMERTMANN na altura, o que o obrigou a socorrer à teoria apresentada por TIMOSHENKO relativa à proporcionalidade, existente em casos bem definidos, entre a força e a velocidade.

A título de exemplo, em 1998 BUTLER et al. e FARRAR compararam mais de 9000 golpes usando os dois métodos e concluíram que *grosso modo* a energia calculada através do método EF2 foi 10% maior que a calculada através do EFV, embora, em

alguns casos se tenham verificado valores de energia obtida através do método EF2 menores do que as obtidas com o método EFV. Mesmo assim considera-se que através do método EF2 se obtém valores de energia superiores, já que a variabilidade dos valores do método EF2 foi significativamente maior do que os do método EFV.

De modo a obter-se uma melhor ideia das diferenças entre estes dois métodos, o autor da presente tese faz referência ao estudo realizado por FARRAR (1998), no qual este apresenta algumas medidas de energia desde o final da década de 70. Desse estudo ressaltam algumas conclusões que passarão a ser descritas a seguir.

Os valores de EF2 são consideravelmente menores do que os de EFV, isto para varas de comprimento curto. Tal facto faz com que seja necessário aplicar um factor de correcção aos valores de EF2. Esse factor de correcção foi denominado de  $K_2$ .

Os valores de EF2 tendem a ser elevados para valores de  $N_{SPT}$  superiores a 50. Por outro lado, os valores de EFV tendem a ser subestimados para valores de  $N_{SPT}$  inferiores a 10. Contudo, esta segunda afirmação requer um cuidado muito especial uma vez que ainda hoje muitos autores se debatem sobre este assunto.

Os valores de EFV e EF2 tendem a coincidir uns com os outros para varas de maior comprimento.

De salientar que estas conclusões também são aplicadas aos modelos de ensaio usados em Portugal, desde que o trem de varas seja curto.

MORGANO & LIANG em 1992 realizaram uma sequência de ensaios de modo a poderem relacionar a eficiência do ensaio com o comprimento das varas, chegando à conclusão que a eficiência do ensaio aumenta com o comprimento das varas, tal como se poderá verificar na Figura 3.2

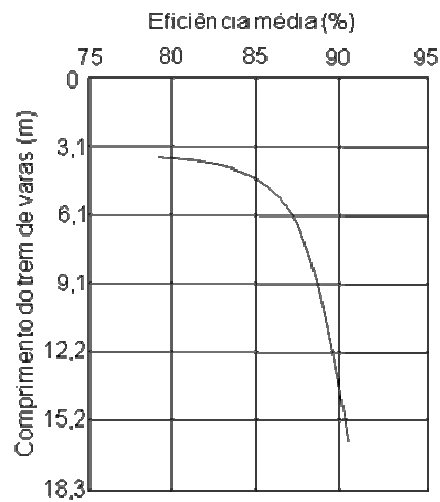


Figura 3.2: Eficiência do ensaio SPT vs comprimento das varas utilizadas no ensaio (MORGANO & LIANG 1992)

Mesmo tendo um grande leque de excelentes trabalhos sobre este assunto, a influência do comprimento das varas no valor da energia contínua ainda hoje a dividir muitos especialistas, sendo que alguns dos mais prestigiados investigadores desta área defendem a ideia da necessidade de corrigir os valores de  $N_{SPT}$  para varas com comprimentos inferiores a 10 m (SCHMERTMANN & PALACIOS, 1979, UTO & FUYKI, 1981; SKEMPTON, 1986; CLAYTON, 1990, MORGANO & LIANG, 1992). Sendo que SKEMPTON (1986) apresentou um conjunto (Quadro 3.1) de factores de correcção para os comprimentos de varas usadas, determinados com base nos dados obtidos por SCHMERTMANN & PALACIOS em 1979 (CAVALCANTE, 2002).

Quadro 3.1: Factores de correcção para os valores de  $N_{SPT}$  em função do comprimento das varas

Comprimento da haste (m)	Factor de correcção para N
> 10	1,00
6 – 10	0,95
4 – 6	0,85
3 – 4	0,75

SKEMPTON (1986)

Em contrapartida, SY & CAMPANELLA em 1993 publicaram um trabalho no qual provam a não necessidade de correcção dos valores de  $N_{SPT}$  devido ao comprimento das varas.

## 4. EQUIPAMENTO UTILIZADO

### 4.1. Considerações iniciais

Antes de entrar no relato da parte experimental desta dissertação, considera-se adequado fazer uma breve referência ao equipamento utilizado, uma vez que é praticamente desconhecido em Portugal.

Tal como referido anteriormente a energia transmitida ao trem de varas pode ser determinada através de dois métodos, o EFV e o EF2, sendo que o método EFV é aconselhado devido à melhor qualidade e fiabilidade dos resultados obtidos. A título de exemplo, ABOU\_MATAR & GOBLE 1997 comentaram que o método EF2 não deve ser usado como método da determinação da energia transmitida ao trem de varas. De acordo com esses autores, apenas com medidas de força não existem formas de avaliar a qualidade dos resultados do ensaio, sendo que a sua utilização pode implicar a ocorrência de graves erros de análise.

A título de curiosidade, o método EF2 surgiu em 1977 por PALACIOS na sequência do aparecimento de grandes dificuldades na medição da velocidade de queda do martelo, devendo-se isso, à fraca qualidade dos acelerómetros utilizados na altura, como já referido anteriormente. Sendo assim, PALACIOS, de modo a contornar a situação, baseou-se na proporcionalidade entre a força e a velocidade apresentada pouco tempo antes por TIMOSHENKO & GOODIER em 1970.

Embora o método EF2 tenha sido, inclusivamente, aconselhado pela norma ASTM D4633 de 1986, este não pode ser usado sem se ter em conta os factores de correcção associados a ele, nomeadamente  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_C$  em que  $K_1$  representa o factor de correcção correspondente à posição da célula de carga,  $K_2$  o factor de correcção correspondente ao comprimento de onda e  $K_C$  o factor de correcção correspondente à relação entre a velocidade medida e a velocidade teórica. Contudo, este factor ( $K_C$ ) tem sido muito controverso uma vez que, muitos autores o consideram incorrecto (RIGGS et al., 1984; CLAYTON, 1990).

Para além dos dois métodos, já referenciados, para a determinação da energia transmitida ao trem de varas, existe um terceiro, o qual é denominado por E2F (4.1). Embora este seja utilizado por muitos poucos investigadores, considera-se necessária uma breve explicação deste método. O método E2F parte do mesmo princípio do método EF2 (4.2), ou seja, baseia-se apenas nos valores da força, não fazendo uso dos valores da velocidade. A principal e única diferença em relação ao método EF2 resulta no facto do primeiro ter como tempo de integração, o tempo correspondente ao primeiro impacto do martelo quando tempo é igual a  $2l/c$ , sendo  $l$  o comprimento do trem de varas e  $c$  a velocidade de propagação da onda neste). Por seu lado, no método EF2 esse tempo corresponde ao tempo para o qual a força iguala o valor zero pela primeira vez. De modo a melhor visualizar a diferença entre estes dois métodos apresenta-se de seguida as suas respectivas fórmulas matemáticas assim como a do método EFV (4.3):

Método E2F:

$$E2F = \frac{c}{E \times a} \int_0^{t=2l/c} F^2 dt \quad (4.1)$$

Método EF2:

$$EF2 = \frac{c}{E \times a} \int_0^{t(F=0)} F^2 dt \quad (4.2)$$

Método EFV:

$$E2F = \int_0^{t=máx} F \times v dt \quad (4.3)$$

em que o parâmetro  $a$  corresponde à área da secção transversal instrumentada,  $E$  ao módulo de elasticidade e  $c$  à velocidade de propagação da onda nas varas (CAVALCANTE, 2002).



Tendo feito novamente a abordagem aos vários métodos disponíveis para a determinação da energia transmitida ao trem de varas, segue-se então a descrição do equipamento utilizado no ensaio prático desta tese.

Tal como referido anteriormente, a componente prática desta dissertação tem como particularidade o uso de equipamento ainda pouco conhecido em Portugal. Sendo assim, o autor desta tese considera mais adequado começar por descrever esses equipamentos, seguindo-se o restante equipamento utilizado.

## **4.2. Sistema de aquisição de dados (SPT ANALYZER)**

O SPT ANALYZER, da PDI (Pile Dynamics Incorporation) consiste num sistema de aquisição de dados conforme se ilustra na Figura 4.1. Simples e fácil de manusear, o SPT ANALYZER revelou-se um sistema de grande utilidade na determinação da energia transmitida ao trem de varas. Este sistema é constituído essencialmente por duas componentes. Uma correspondente à unidade de aquisição de dados (Figura 4.2) e outra a um segmento de vara do SPT no qual estão incorporados medidores de deformação e ainda se poderão aparafusar acelerómetros (Figura 4.11) para além dos cabos de conexão (Figura 4.5).

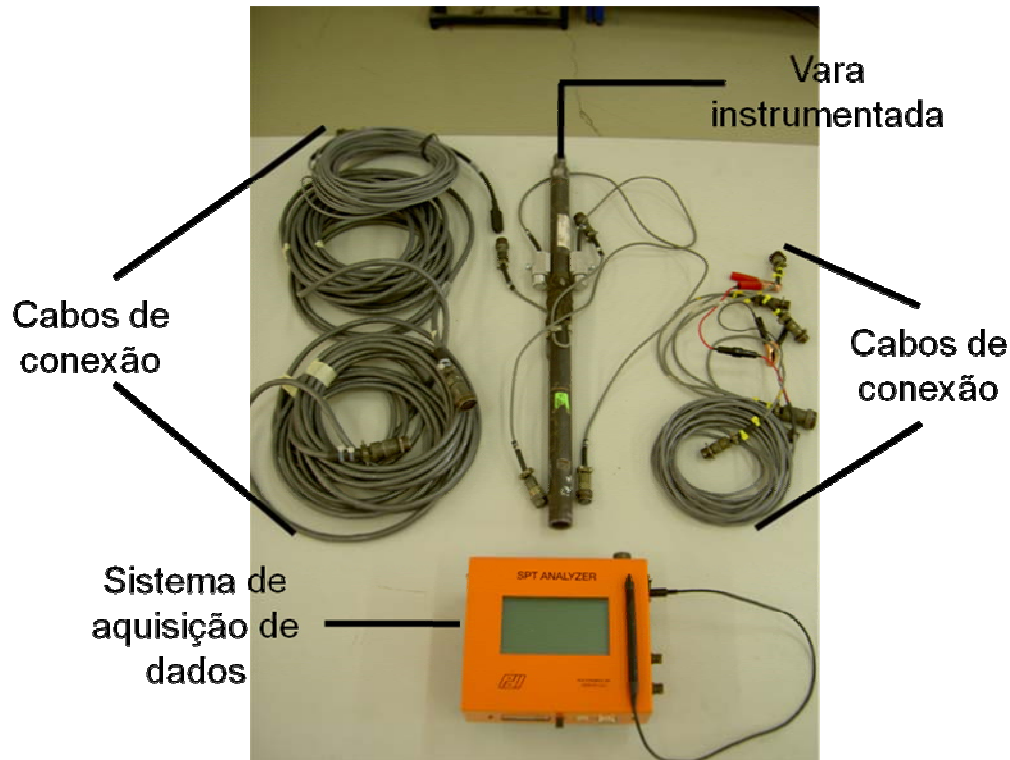


Figura 4.1: Sistema de aquisição de dados (SPT ANALYZER)

O SPT ANALYZER usado na pesquisa desta dissertação foi adquirido junto da Pile Dynamics Incorporation (PDI) pelo departamento de Engenharia Civil do Politécnico da Guarda. De seguida serão apresentadas as principais características de cada componente deste sistema.

Consola de aquisição de dados (Figura 4.2). Consiste num pequeno aparelho de fácil transporte, com dimensões são 205 mm x 175 mm x 115mm e um peso rondando os 3 kg. Este possui um pequeno monitor no qual são apresentados os resultados do ensaio (gráficos) mas também informações relativas a este (numero de golpes, diâmetro do furo, nome do projecto, etc.). Para além da visualização dessas propriedades, é ainda possível introduzir manualmente o nome do executante, nome do projecto no qual serão gravados os dados, diâmetro do furo, profundidade do ensaio, entre outros. A principal característica desta consola consiste no facto de possuir um sistema de dados em quatro canais, isto é, um par de canais para os medidores de deformação e outro par de

medidores para os acelerómetros. Destes quatro medidores obtém-se os valores da força assim como os da velocidade da queda do martelo.



Figura 4.2: Sistema de aquisição, exibição e gravação de dados

Cartão de memória (Figura 4.3). Sistema de armazenamento dos dados obtidos durante o ensaio. Possui uma capacidade de 128 MB, sendo necessário introduzi-lo no local apropriado da consola de aquisição de dados sempre que se realizar campanhas de ensaios (Figura 4.4).



Figura 4.3: Cartão de memória da consola de aquisição de dados



Figura 4.4: Local de encaixe do cartão de memória na consola de aquisição de dados

A consola de aquisição de dados é alimentada por uma bateria de 12V DC sendo que esta poderá ser recarregada num simples tomada eléctrica (100 – 250V AC).

Os cabos de conexão (Figura 4.5) servem para conectar a consola de aquisição à bateria a ao segmento de vara do SPT, no qual estão acoplados os medidores de deformação e poderão ainda ser aparafusados os acelerómetros. De referir que esses cabos possuem um sistema de conexão rápida, facilitando assim as ligações entre os vários componentes (Figura 4.6).



Figura 4.5: Cabos de conexão do SPT ANALYZER



Figura 4.6: Sistema de conexão rápida

Os medidores de deformação (tipo *strain-gauge*) (Figura 4.7) encontram-se acoplados no segmento da vara do SPT, estando espaçados entre si cerca de 25 cm. Encontram-se distanciados da superfície de impacto cerca de 53 cm, sendo o medidor de deformação mais próximo da superfície designado como “strain-gauge 1”. Esses medidores são formados em ponte de Wheatstone. Por se encontrar mais próximo da superfície, e por consequente ser o primeiro a ser sensibilizado pela onda gerado pelo impacto do martelo, o “strain-gauge 1” é geralmente escolhido como sendo o primeiro medidor de deformação a captar e registrar a onda de tensão (*trigger*), embora o operador tenha a possibilidade de escolher o outro medidor (“strain-gauge 2”). Na execução do ensaio prático desta dissertação usou-se sempre o “strain-gauge 1” como primeiro medidor a captar e registrar a onda de tensão.



Figura 4.7: Medidores de deformação

É extremamente importante referir que a posição dos medidores de deformação anteriormente referida é a habitualmente usada, sendo que na componente prática desta dissertação tal não se verificou. A vara instrumentada, preparada pela PDI, apresentava os medidores de deformação ao mesmo nível, estando inclusivamente abaixo dos acelerómetros (Figura 4.8).



Figura 4.8: Posição dos medidores de deformação e acelerómetros

Os acelerómetros possuem uma sensibilidade de voltagem da ordem de 1,0 mV/g cada, cuja resolução ronda os 0,02g podendo assim registar acelerações até valores iguais à 5000g. Estes acelerómetros são aparafusados ao segmento de vara, num furo existente nesta através de um parafuso. São aparafusados de modo a ficarem em posição oposta em relação um ao outro e distam cerca de 3 cm aos medidores de deformação (Figura 4.9). De referir que, de modo a proteger os acelerómetros, por serem frágeis, estes encontram-se no interior de um bloco de alumínio cujas dimensões são 25 mm x 25 mm x 25 mm (Figura 4.10).



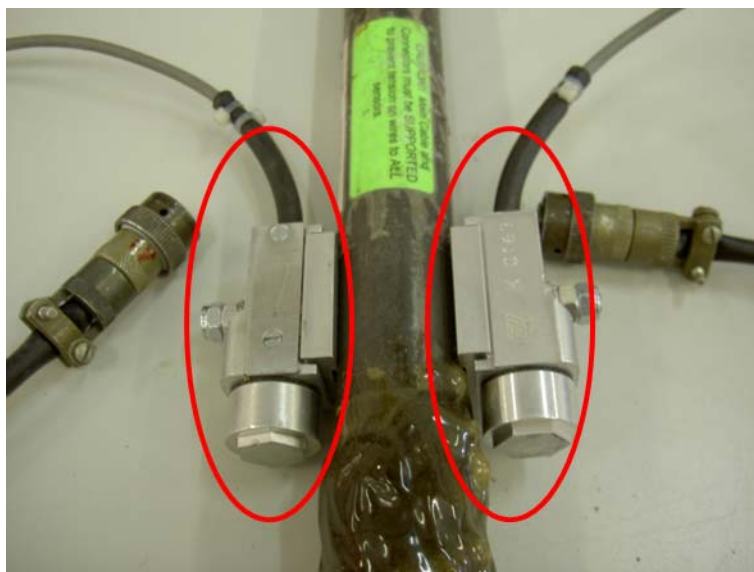


Figura 4.9: Acelerómetros aparafusados opostamente um ao outro

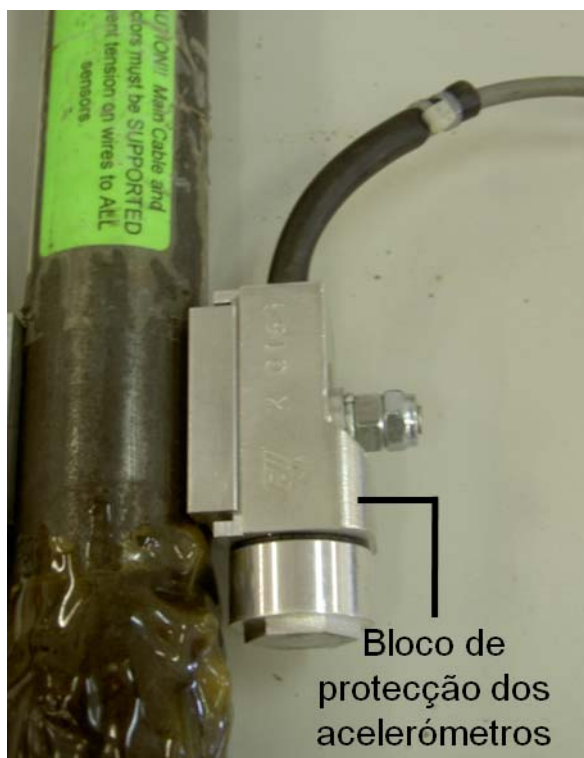


Figura 4.10: Bloco de protecção dos acelerómetros

Segmento de vara do SPT (Figura 4.11). Este segmento, de comprimento igual a 61 centímetros, é constituído por aço maciço. Nele, tal como já foi referido anteriormente, estão acoplados os medidores de deformação, que fornecerão os valores da força. Para além desses medidores, poderão ser aparafusados acelerómetros para determinação da velocidade da queda do martelo.



Figura 4.11: Vara instrumentada na qual se encontram os medidores de deformação e acelerómetros

A justificação e implicação do facto dos medidores de deformação não se encontrarem espaçados, entre si, 25 cm encontra-se exposta de seguida.

A diferença de tempos entre o sinal da força e da velocidade é devida a estes se encontrarem a níveis diferentes, sendo que o tempo de chegada do sinal relativo à força é menor do que o tempo de chegada relativo à velocidade (Figura 4.12).

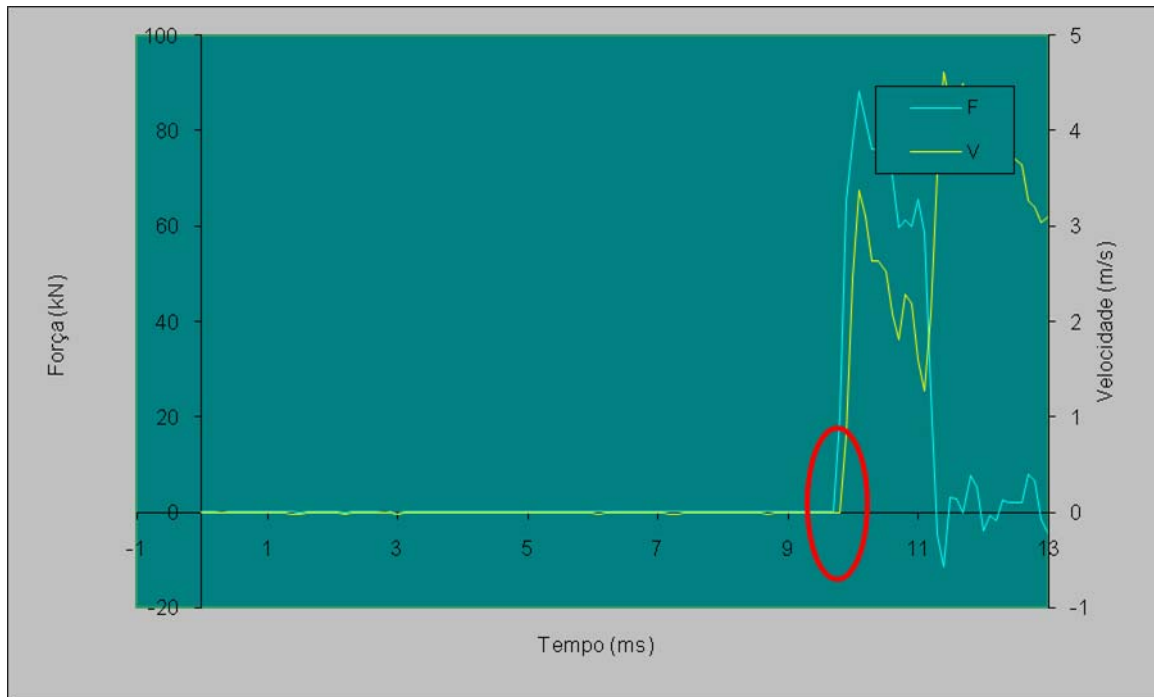


Figura 4.12: Diferença de tempo entre os tempos de chegada do sinal de força e de velocidade

Isto deve-se unicamente ao facto dos sensores que fornecem o sinal da força (medidores de deformação) se encontrarem num nível inferior relativamente aos acelerómetros, que fornecem o sinal de velocidade tal como verificado na Figura 4.8. A onda ao ser gerada pelo impacto do martelo passa pelo primeiro acelerómetro e seguidamente pelo primeiro medidor de deslocamento. Ao ser reflectida (na interface solo – amostrador) esta percorre novamente o trem de varas passando desta vez primeiro no segundo medidor de deslocamento e por fim no segundo acelerómetro, fazendo com que o sinal de força tenha um tempo de chegada inferior ao sinal da velocidade.

Um esquema exemplificativo da posição dos sensores utilizados nesta dissertação apresenta-se de seguida (Figura 4.13). Para além deste, será também apresentado um esquema exemplificativo da posição habitualmente utilizada dos sensores (Figura 4.14).

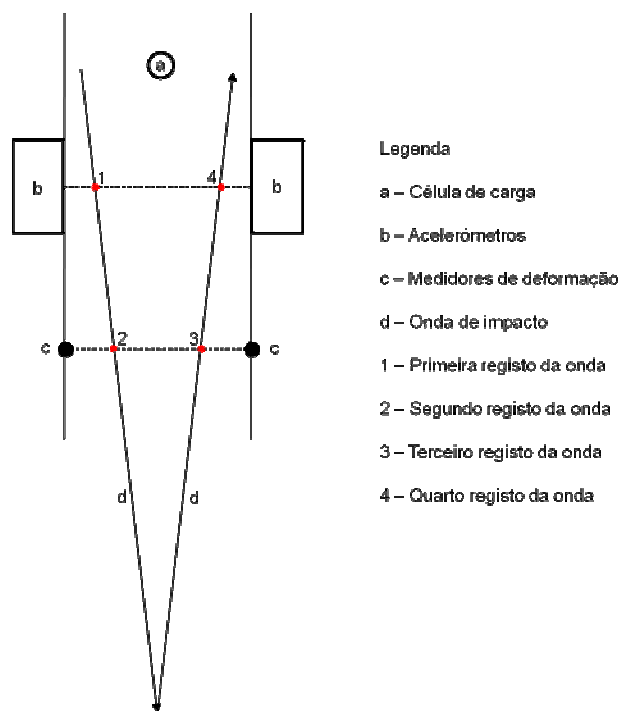


Figura 4.13: Esquema exemplificativo da posição dos sensores utilizados nesta dissertação

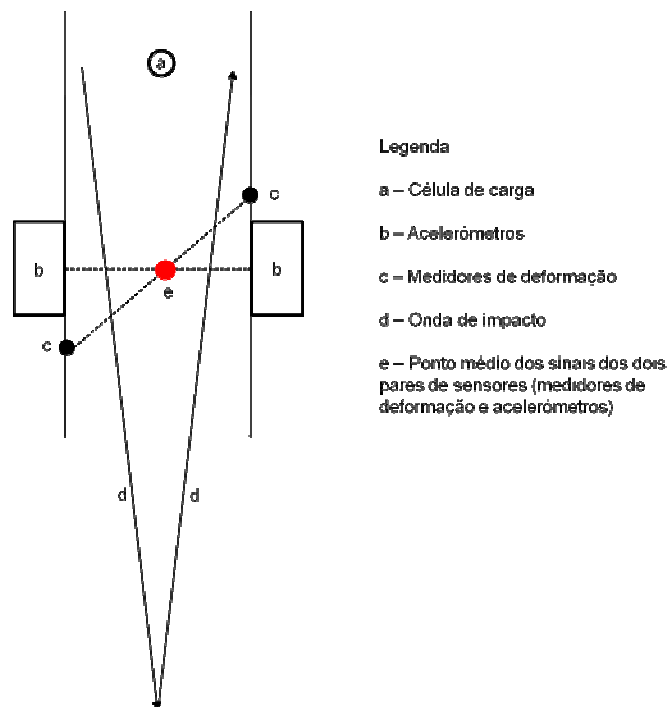


Figura 4.14: Esquema exemplificativo da posição habitualmente utilizada dos sensores

O SPT ANALYZER capta e fornece o registo da força medida, em função do tempo, nas duas posições relativas aos dois medidores de deformação. Mas também fornece de imediato o valor da velocidade da queda do martelo, que é utilizada nos cálculos da energia transferida, com base nos valores da aceleração em função do tempo. Por cada pancada realizada a consola de aquisição de dados exhibe, na sua tela, e em tempo real o valor da energia transmitida ao trem de vara segundo os dois métodos anteriormente referidos, o EFV e o EF2. Para além disso, também permite verificar em tempo real a qualidade dos registos assim como conhecer o deslocamento vertical do trem de varas ocorrido em cada pancada do martelo. A Figura 4.15 apresenta um registo exibido pela consola do SPT ANALYZER.

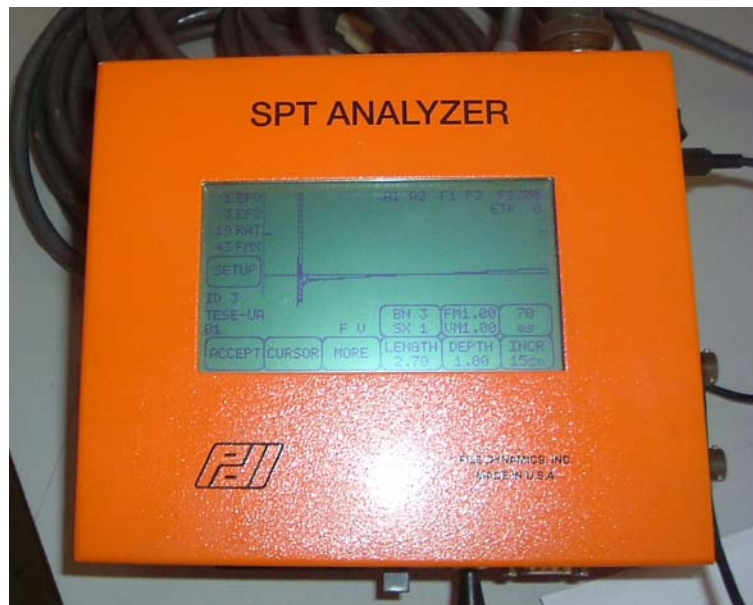


Figura 4.15: Representação dum registo captado e exibido pelo SPT ANALYZER

Para se obter esses valores com um elevado grau de exactidão, a consola de aquisição requer determinados dados de calibração de acordo com as características das varas utilizadas, sendo que essa calibração possui uma validade de dois anos. Desse modo, segue-se o Quadro 4.1 no qual serão apresentados esses dados de acordo com a norma utilizada em Portugal (ASTM D1586/58T).

Quadro 4.1: Factores de calibração dos vários sensores utilizados

	Medidor de deformação		Acelerómetro	
	F1	F2	A1	A2
Factor de calibração	223.40 ME/V	223.92 ME/V	353 G/ciclo	400 G/ciclo

Devido a fragilidade deste equipamento, considera-se necessário enumerar alguns dos principais cuidados a ter:

- Primeiro, e acima de tudo, é fundamental ter a noção que este equipamento não é a prova de água. Sendo assim, em caso de chuva é necessário o uso de um sistema de cobertura sobre o equipamento, principalmente sobre as ligações e a consola de aquisição de dados, ou então a paragem da execução do ensaio.
- Segundo, e visto que os acelerómetros são aparafusados ao segmento da vara do SPT é conveniente a inspecção periódica aos acelerómetros, de modo a verificar que estes se encontram bem aparafusados.
- Por fim, é fundamental manter os medidores de deformação e acelerómetros em bom estado de conservação, de modo a garantir uma boa qualidade de resultados.

Relativamente à aquisição de dados propriamente dita, esta é realizada a uma frequência de amostragem de 20000Hz, sendo que cada registo captado é composto por quatro sinais. Dois de deformação, que fornecem os valores da força, (F1 e F2) e dois de aceleração, que fornecem os valores da velocidade (V1 e V2).

Tal como referido anteriormente, o monitor da consola de aquisição de dados permite definir alguns dos parâmetros do ensaio e até ajustar valores já existentes. No início de cada nova campanha de ensaios, a consola de aquisição requer alguma informação a qual terá que ser introduzida manualmente pelo operador. Dessa informação consta a Confirmação e/ou Alteração da data e hora dos registos, nome do projecto no qual serão

gravados os dados obtidos, número do furo, tipo de martelo utilizado ao longo do ensaio, nome do operador, diâmetro das varas e valor da energia potencial do sistema, entre outros, sendo estes os principais. De seguida será necessário introduzir as informações relativas às condições de ensaio, designadamente, comprimento do trem de varas (distância da boquilha do amostrador até ao ponto médio da secção instrumentada) e profundidade a que se irá realizar o ensaio.

Tendo introduzido toda essa informação na consola de aquisição de dados, esta encontra-se preparada para captar, registar e exibir os resultados relativos ao ensaio. De salientar que caso algum dos medidores de deformação e/ou acelerómetros estiver danificado e por consequência em mau funcionamento será apresentado uma mensagem de notificação na consola de aquisição de dados. A Figura 4.16 ilustra o aspecto da mensagem de notificação na consola.

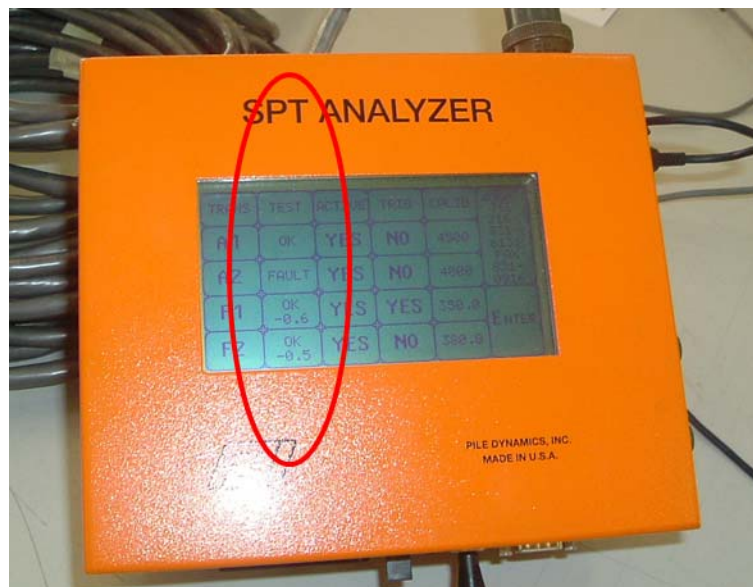


Figura 4.16: Ilustração da mensagem de notificação exibida na consola do SPT ANALYZER

Para além de requisitar uma certa informação no início do ensaio, a consola também permite no decorrer do ensaio seleccionar quais os registos obtidos que deverão ser gravados, isto é, permite ao operador escolher quais os registos que pretende gravar para futura interpretação

Após a execução do ensaio, resta gravar os dados obtidos, para posterior tratamento e análise, o que pode ser realizado de duas maneiras:

- a) Aproveitando os dados na sua totalidade
- b) Utilizando apenas metade. Neste caso os dados serão “cortados” em metade ficando apenas com a parte inicial do registo de cada golpe. A grande vantagem deste método é o economizar de espaço, contudo, perderá-se a parte final relativa do registo, a qual é de grande interesse já que nesta estão representados os golpes secundários do martelo no batente aquando execução da pancada, tal como se irá verificar mais adiante. Por isso mesmo, aconselha-se a gravação dos dados na sua totalidade. Esses dados são gravados em formato \*.w01 de modo a poderem ser analisados e tratados no software que acompanha o SPT ANALYZER, o PDA-W, sendo que a descrição deste software será realizada mais adiante.

Com os dados gravados, resta passá-los para um computador de modo a poder realizar-se o seu tratamento. Essa passagem poderá ser feita ligando a consola de aquisição directamente ao computador, ou introduzindo o cartão de memória da consola no computador.

Tendo realizado o ensaio e gravado os dados relativos a este, resta analisar e tratá-los. Para tal, e já como foi referido, é utilizado um software próprio da PDI denominado PDA-W (Pile Driving Analyzer). Este software fornecido pela PDI aquando da aquisição do SPT ANALYZER permite, para além de visualizar, tratar e ajustar os dados, editar os parâmetros iniciais do ensaio (nome do projecto, características do furo, constantes de calibração etc.) assim como escolher quais os registos que deverão ser considerados, de modo a garantir uma melhor qualidade dos dados. A título de curiosidade e para os que estão familiarizados, este software é em tudo muito idêntico ao software utilizado no ensaio de integridade de estacas, o PDI-W, que é igualmente fornecido pela PDI.

De modo a fornecer uma ideia mais precisa do aspecto do software segue-se uma imagem na qual está representado um dos registos obtidos na componente prática desta dissertação (Figura 4.17).





Figura 4.17: Ilustração do aspecto do software PDA-W

Tendo sido feita uma breve descrição do equipamento de aquisição de dados e do seu software, resta agora a descrição do restante equipamento utilizado.

Os ensaios SPT relativos a esta dissertação foram realizados com furação prévia executada por intermédio de trado de rotação. O equipamento constava de trados helicoidais de 100 mm de diâmetro e trechos de 1 m, sendo que não foi utilizado revestimento em nenhum dos furos. A Figura 4.18 ilustra o equipamento de perfuração utilizado.



Figura 4.18: Equipamento de furação utilizado para a execução dos ensaios SPT

Esta máquina, de marca PAGANI, possui um sistema de disparo automático do martelo. O dispositivo consta de um martelo de massa igual a 62 kg que cai de uma altura teórica de 76,5 cm, sendo que este valor não se observou, tal como se irá verificar mais adiante. Por fim, o número de pancadas é registado automaticamente no painel de controlo da máquina.

Quanto às varas (Figura 4.19), estas apresentavam um comprimento de 1 m, cujo diâmetro medido foi de 32 mm e massa de 6,25 kg.

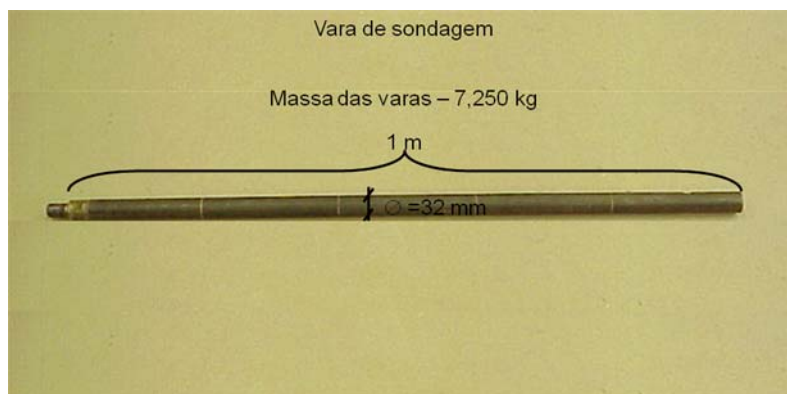


Figura 4.19: Representação das varas utilizadas nos ensaios assim como as suas características

Já o amostrador (Figura 4.20), apresenta uma massa de 7,6 kg, (6,8 kg recomendados) e um comprimento total de 820 mm. O aspecto do amostrador desmontado é apresentado na Figura 4.21.

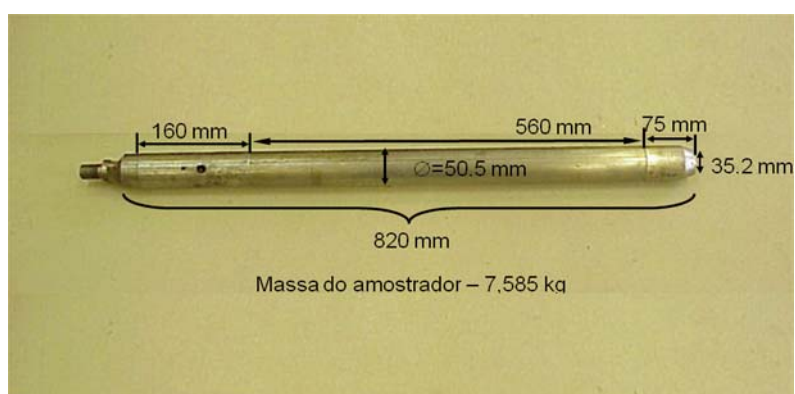


Figura 4.20: Representação do amostrador utilizado nos ensaios assim como as suas características



Figura 4.21: Amostrador utilizado nos ensaios desmontado

O batente usado em quatro das seis campanhas realizadas (Figura 4.22) possuía diâmetro igualmente de 32 mm e um comprimento de 13 cm. Por sua vez, o segundo batente utilizado (Figura 4.23) possuía um diâmetro de 69 mm e comprimento aproximadamente igual (Figura 4.24).



Figura 4.22: Batente usado em quatro das seis campanhas de ensaio realizadas

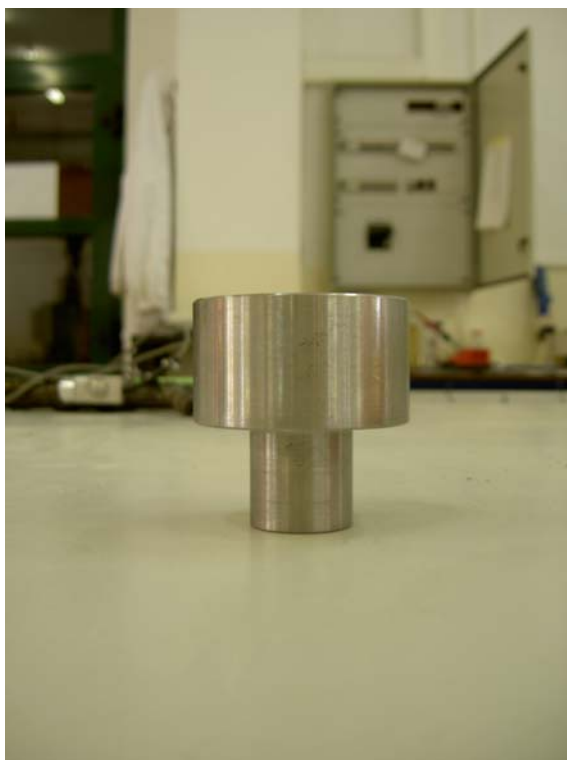


Figura 4.23: Batente usado nas restantes duas campanhas de ensaio



Figura 4.24: Ilustração dos dois batentes utilizados nesta dissertação



## 5. ENSAIOS PRÁTICOS DA DISSERTAÇÃO

### 5.1. Considerações iniciais

Os ensaios desta tese foram realizados na cidade da Guarda, mais propriamente nos terrenos vizinhos ao Instituto Politécnico da Guarda (Figura 5.1), cujo enquadramento geológico se apresenta em seguida.



Figura 5.1: Zona ensaiada

### 5.2. Enquadramento geológico

A área estudada é abrangida pela carta geológica 1:50000 da Guarda (Folha 18-C). A nível geográfico a área estuda pertence à Carta 203 (Guarda), sendo que um excerto dessa carta é apresentado na Figura 5.2.

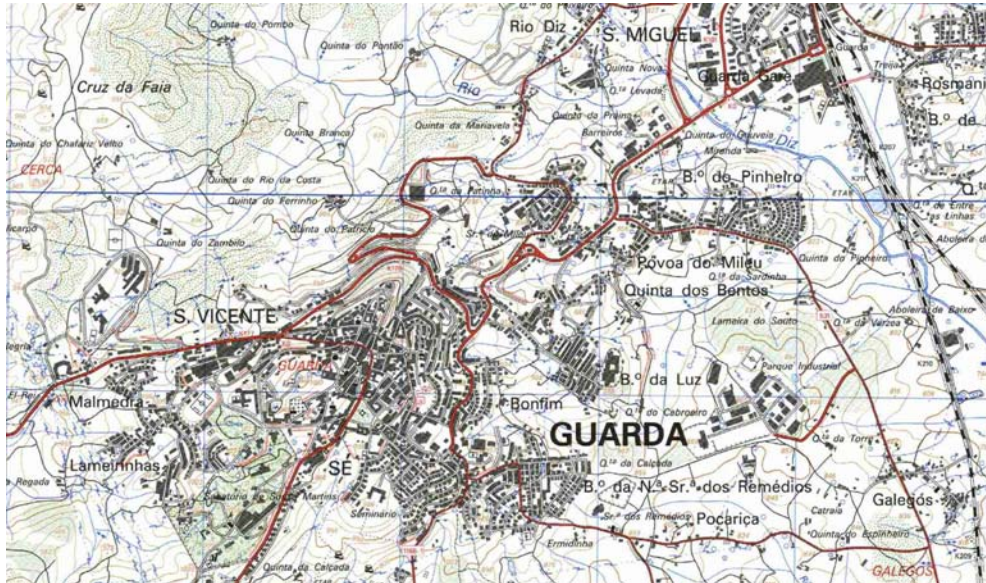


Figura 5.2: Enxerto do mapa geográfico da zona estudada (Guarda)

O local sob investigação situa-se na região montanhosa do maciço da Estrela, na região nordeste de Portugal, a cotas de aproximadamente 1000 m.

Quanto à geologia da zona, esta é quase exclusivamente marcada pelos granitos, os quais apresentam pequenas manchas intercaladas, que correspondem a xistos, filões de quartzo e rochas básicas e poucos depósitos aluviais recentes (Figura 5.3)

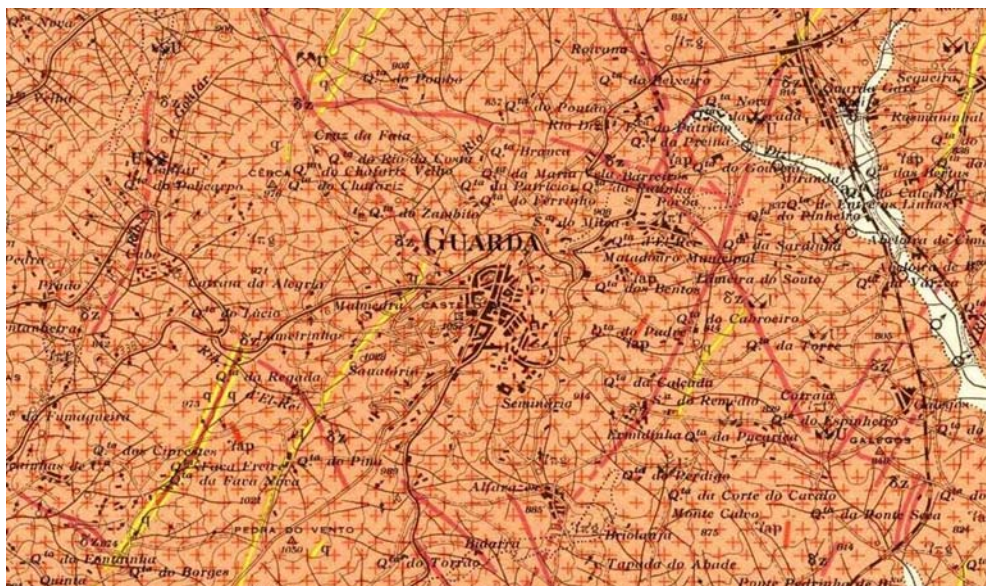


Figura 5.3: Excerto do mapa geológico da zona investigada



Relativamente à composição mineralógica, a rocha mãe do saprólito estudado caracteriza-se por ser um granito do tipo monzonítico, de duas micas, com largo predomínio da biotite, apresentando textura porfíroide de grão muito grosseiro, com dimensão média dos cristais da matriz de 7 mm, tendo os fenocristais por vezes orientação preferencial, comprimentos médios de 45 mm, podendo atingir os 70 mm. Como elementos essenciais referem-se, quartzo, oligoclase, microclina, albite, biotite e moscovite. Os minerais acessórios compreendem apatite, zircão e magnetite, sendo a caulinite, sericite e clorite os minerais secundários mais abundantes. Os terrenos de cobertura são formados por aluviões recentes e depósitos de fundo de vale que não se apresentam na área em estudo. Na Figura 5.4 apresenta-se um aspecto da zona estudada.



Figura 5.4: Representação dos granitos da zona da Guarda

### 5.3. Campanhas de ensaio

Durante as 6 campanhas de ensaios foram registados 163 golpes, sendo que todas as campanhas foram realizadas estando os medidores de deformação e os acelerómetros localizados próximo do batente do ensaio. As 6 campanhas foram executadas em 3 furos, sendo que em cada furo se realizou duas campanhas (uma a um metro de profundidade e outra a dois metros). Embora os três furos tenham sido feitos muito próximos uns dos



outros (distavam um metro e meio entre eles (Figura 5.5)) cada um deles possui uma característica própria.

- No primeiro furo, designado por F1, as duas campanhas realizadas (uma a um metro e outra a dois metros de profundidade) foram executadas a um ritmo lento, isto é, com uma frequência de queda do martelo por minuto mais baixa.
- Por sua vez, no segundo furo, designado por F2, as duas campanhas relativas a este, foram executadas a um ritmo mais elevado, ou seja, uma frequência de queda do martelo por minuto mais elevada.
- Por fim no terceiro furo, designado como F3, as campanhas associadas a este, foram realizadas a um ritmo igualmente lento mas desta vez usando um batente mais largo relativamente aos furos F1 e F2 (Figura 5.6).

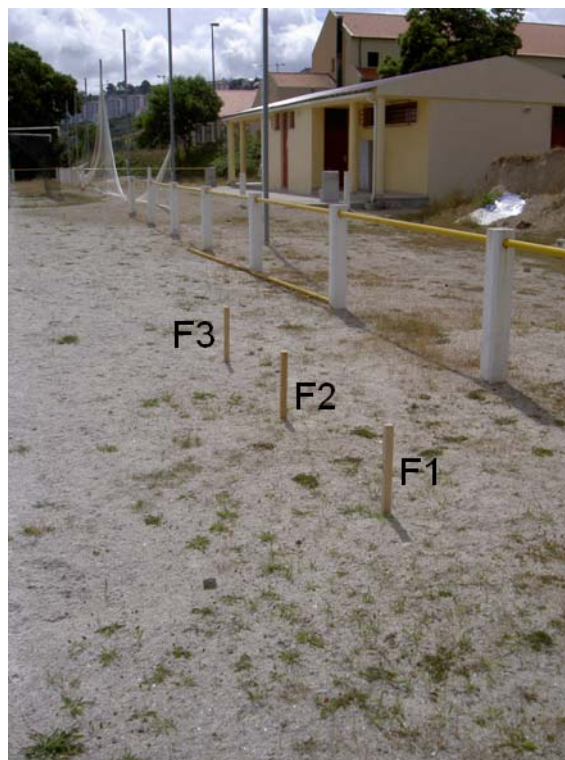


Figura 5.5: Localização dos furos nos quais se realizaram as campanhas de ensaio



Figura 5.6: Batentes usados nas campanhas de ensaio

Em cada um dos furos realizaram-se medidas de determinação da frequência de queda do martelo e nos furos F1 e F3 foram realizadas medidas da altura de queda do martelo, sendo que os métodos usados para obter essas medidas serão descritos mais adiante.

Uma vez que todas as seis campanhas de ensaio realizadas ocorreram sem nenhum problema e terem sido muito parecidas entre elas, não se considera justificativo individualizar cada uma.

Todas as seis campanhas foram realizadas em solo residual granítico em furos de 100 mm de diâmetro. Nos três ensaios realizados a um metro de profundidade a distância entre a ponta do amostrador e os sensores foi de 3,07 metros, enquanto nos três ensaios realizados à profundidade de dois metros essa distância foi de 4,07 metros.

Quanto ao número de pancadas obtidas para cada campanha, este não variou muito de campanha para campanha, isto para profundidades iguais. Tal facto, não poderia deixar de ser esperado, uma vez que os furos encontravam-se relativamente próximos e o

terreno ensaiado apresentar razoável homogeneidade. De modo a visualizar melhor as diferenças do número de golpes para cada campanha o Quadro 5.1 apresenta de uma forma resumida o número de golpes  $N_{SPT}$  de cada ensaio.

Quadro 5.1: Quadro resumo dos valores de  $N_{SPT}$  obtidos em cada ensaio

Profundidade	Intervalo $N_{SPT}$ (cm)	Número de golpes obtidas para os furos		
		F1	F2	F3
1m	0 – 15	6	6	6
	15 – 30	8	10	8
	30 – 45	11	11	11
2m	0 – 15	8	7	6
	15 – 30	10	10	8
	30 – 45	13	12	12

Da observação deste quadro é perfeitamente observável a pequena variação dos valores de  $N_{SPT}$  para as várias campanhas realizadas à mesma profundidade.

Tal como já referido anteriormente a consola de aquisição do SPT ANALYZER exibe um gráfico tempo vs força para cada pancada efectuada. Para além do gráfico, a consola também exibe, em tempo real, os valores da energia medida pelos dois métodos já referidos, o EFV e o EF2. Estes valores são calculados pela própria consola usando os valores médios de cada par de sensores, isto é, os medidores de deformação e os acelerómetros. Contudo, convém referir que, caso o operador assim o deseje pode proceder ao calculo dos valores da energia apenas com base num dos sensores de cada par, podendo inclusivamente escolher qual dos sensores de cada par que deve ser usado. Em condições normais é aconselhado a medição da energia com base na média de cada par de sensores, contudo, caso se suspeite, ou se tenha a confirmação, de um

mau funcionamento da parte de um deles é aconselhado a sua desactivação, obtendo-se assim os valores de energia apenas com base num dos sensores. Tendo isso em conta, considera-se oportuno voltar a chamar à atenção para uma verificação periódica da fixação dos acelerómetros e conservação dos medidores de deformação. Para além disso, também é recomendado visionar, no fim de cada pancada, o gráfico tempo vs força, quando este é exibido no monitor da consola de aquisição. Isto de modo a poder tomar as medidas certas em casos de visionamento de anomalias. Convém referir que devido à baixa resolução do monitor da consola de aquisição de dados, as anomalias, eventualmente existentes, poderão passar despercebidas aos olhos de um operador inexperiente. Contudo, essas anomalias são perfeitamente visíveis no programa de visualização e tratamento de dados, o PDA-W.

Considera-se necessário referir que o valor de força máxima para cada golpe (FMX), exibida no monitor da consola aquando do ensaio é referente à primeira onda de compressão, isto é, ao primeiro impacto do martelo com o batente. Por sua vez, o valor da velocidade máxima (VMX) também exibida no monitor da consola poderá estar associado ou ao primeiro impacto ou então a um segundo impacto, caso este ocorra, do martelo com o batente. Isto poderá acontecer, não por questões relacionadas com a consola de aquisição de dados, mas sim com aspectos exteriores à execução do ensaio, nomeadamente características do solo (resistência do solo a penetração do amostrador), existência de atrito entre o amostrador e as paredes do furo, etc. (CAVALCANTE, 2002).

## **5.4. Execução do ensaio**

### **5.4 1. Furação e execução do ensaio**

As seis campanhas de ensaio foram realizadas, tal como já foi referido, num solo residual granítico. A zona ensaiada encontrava-se limpa e completamente horizontal, uma vez que se tratou de um campo de futebol pelado, cujo acesso foi logicamente muito acessível.

Uma vez que os três pares de campanhas (duas por furo) foram realizadas relativamente próximas umas das outras e o modo de execução do ensaio foi o mesmo para cada par, considera-se desnecessário descrever a preparação e execução de cada campanha. Sendo assim, segue-se a descrição generalista da preparação e execução do ensaio num dos furos (duas campanhas) voltando a chamar a atenção que este procedimento é comum aos três furos.

Com a máquina de furação posicionada e nivelada na zona a ensaiar (Figura 5.7), colocam-se os trados de fixação, começando de seguida a abertura do furo. Esta realizou-se a um ritmo normal já que não se pretendia perturbar o solo a ensaiar.



Figura 5.7: Sistema de controlo do nivelamento da máquina de furação

Os detritos resultantes da furação foram sempre retirados de modo a evitar a queda destes no fundo do furo, e assim influenciar a experiencia (Figura 5.8).



Figura 5.8: Limpeza dos resíduos aquando da furação

Tendo o furo chegado a um metro de profundidade retiram-se os trados e a cabeça de rotação (Figura 5.9) colocando no seu lugar a peça centralizadora do trem de varas (Figura 5.10).



Figura 5.9: Cabeça de rotação da máquina de furação



Figura 5.10: Peça centralizadora do trem de varas



Em seguida colocou-se o batente na vara instrumentada, e esta no trem de varas com o amostrador dando início ao ensaio. De modo a facilitar a contagem do número de golpes em cada trecho de 15cm marcou-se na vara que se encontrava logo a seguir à vara instrumentada, os três intervalos de medida (Figura 5.11).



Figura 5.11: Marcação dos intervalos de medida do ensaio (15cm)

Para finalizar o ensaio, gravaram-se os dados recolhidos na consola do SPT ANALYZER.

#### **5.4.2. Medição da altura e da frequência de queda do martelo**

Tal como referido anteriormente, realizaram-se duas medidas da altura da queda do martelo. Uma no furo F1 e outra no F3. O método usado para determinar a altura consistiu em prender, com auxílio de fita-cola, um marcador de cor escura na parte superior do martelo. O marcador foi colado sobre a parte superior do martelo de modo a que a sua ponta estivesse em contacto com os veios hidráulicos do equipamento. Uma vez que essa parte da máquina de ensaio era de cor amarela, o marcador usado (vermelho) era perfeitamente visível (Figura 5.12).





Figura 5.12: Ilustração do marcador colado na parte superior do martelo e em contacto com os veios hidráulicos do equipamento

O martelo ao ser levantado, pelo sistema de levantamento, fez com que o marcador também fosse levantado, marcando na máquina o trajeto feito por este (Figura 5.13).



Figura 5.13: Marca deixada pelo marcador no veio hidráulico do equipamento ao ser levantado por este

Ao ser libertado, o martelo cai livremente até atingir o batente. Mais uma vez o marcador marca o trajecto realizado por este na máquina. A altura de queda do martelo é determinada pela diferença entre as duas medidas lidas correspondentes aos extremos da linha marcada. Estas leituras foram realizadas com auxílio de uma fita métrica que se encontrava colada a máquina de ensaio como se observa na Figura 5.14.

A Figura 5.16 representa um esquema exemplificativo do método usado para a determinação da queda do martelo é apresentado de seguida.

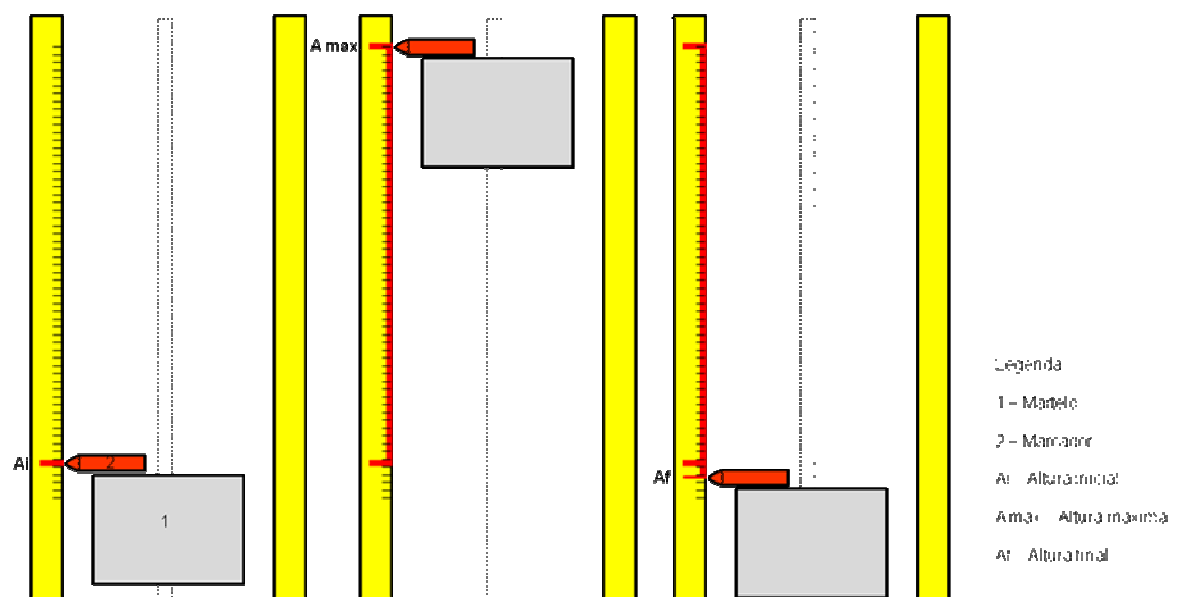


Figura 5.14: Representação do método usado para a determinação da altura de queda do martelo

Por outras palavras, a altura de queda do martelo é dada pela diferença entre a altura máxima ( $A_{max}$ ) e a altura final ( $A_f$ ). O facto de a altura inicial ( $A_i$ ) e a final não coincidirem deve-se à cravação do amostrador aquando da pancada.

Por fim, resta descrever qual o método utilizado para a determinação da frequência de queda do martelo. Tal medição foi realizada com um simples cronómetro de bolso, sendo que se mediu o tempo necessário para que se efectuassem quatro ciclos de queda, em que cada ciclo compreendia a subida e queda do martelo.

## **6. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS**

### **6.1. Considerações iniciais**

Neste capítulo irão ser apresentados os resultados obtidos nas seis campanhas realizadas para esta dissertação. Desses resultados salientam-se os valores da força e da velocidade, através dos quais se calcula a eficácia, assim como o valor da penetração definitiva do amostrador (DFN) por cada pancada. Serão também apresentados os gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade, assim como os gráficos Tempo vs Deslocamento e Tempo vs Energia EFV obtidos para a primeira e última pancada de cada campanha, isto apenas pelo facto do registo gráfico de todas as campanhas serem muito parecidos. Para finalizar, apresentam-se igualmente os resultados das medições da altura de queda do martelo e da frequência de queda deste.

De modo a facilitar a percepção dos valores obtidos assim como possibilitar a comparação destes, estes serão apresentados de acordo com os seus níveis de comparação, isto é, os do F1 com os do F2 e os do F1 com os de F3.

### **6.2. Furos F1 e F2**

Nos Quadros 6.1 a 6.4 apresenta-se um resumo com os valores medidos directamente através do ensaio, ou seja, a força, a velocidade e a penetração definitiva do amostrador (DFN) por pancada, para as profundidades de 1 e 2m, bem como o cálculo da eficácia. Os registos gráficos são evidenciados nas Figuras 6.1 a 6.8.

Quadro 6.1: Quadro resumo dos valores medidos directamente nos furos F1 e F2 à profundidade de um metro

Profundidade 1m								
Trechos do furo		Pancada	Força (kN)		Velocidade (m/s)		Penetração definitiva (DFN) (mm))	
F1	F2		F1	F2	F1	F2	F1	F2
Primeiro trecho (0–15cm)		n1	88,25	87,25	4,62	4,85	30,73	30,46
		n2	107,61	110,30	5,51	5,94	32,59	36,87
		n3	105,67	108,51	5,38	5,86	31,59	32,03
		n4	106,66	109,24	5,54	5,89	28,92	31,66
		n5	106,56	110,88	5,51	5,81	24,99	30,13
		n6	106,88	110,56	5,48	5,77	25,88	27,82
Segundo trecho (15–30cm)	Segundo trecho (15–30 cm)	n7	106,93	109,09	5,51	5,62	26,97	25,04
		n8	105,88	111,51	5,58	5,55	25,88	23,12
		n9	108,51	112,35	5,25	5,56	25,63	22,69
		n10	106,51	111,83	4,62	5,48	21,89	22,10
		n11	107,30	110,35	5,47	5,50	23,68	20,80
		n12	107,35	107,19	5,56	5,49	24,57	18,26
		n13	107,67	107,98	5,57	5,52	22,60	20,40
		n14	107,83	106,51	5,50	5,47	22,78	19,51
Terceiro trecho (30–45cm)	Segundo trecho (15–30 cm)	n15	107,72	108,62	5,53	5,43	20,57	19,39
		n16	108,40	109,19	5,40	5,38	20,46	19,37
		n17	107,56	106,04	5,40	5,38	20,71	17,92
	Terceiro trecho (30–45cm)	n18	106,40	107,57	5,41	5,23	18,18	19,47
		n19	107,77	110,51	5,31	5,32	18,22	18,37
		n20	103,13	109,62	5,18	5,19	19,83	18,27
		n21	107,40	107,40	4,96	5,28	19,47	19,37
		n22	104,30	108,40	5,18	5,33	18,82	17,19
		n23	104,88	109,83	5,15	5,25	20,48	17,27
		n24	108,41	108,25	5,13	5,35	19,80	18,10
		n25	107,35	109,35	5,27	5,40	19,88	18,48
		n26		108,93		5,41		16,93
		n27		110,04		5,46		17,34

Quadro 6.2: Quadro resumo dos valores da eficácia para cada pancada dos furos F1 e F2, a um metro de profundidade

Profundidade 1m				
Trechos do furo		Pancada	Eficácia (%)	
F1	F2		F1	F2
Primeiro trecho (0–15cm)		n1	65,13	58,15
		n2	97,99	100,83
		n3	96,25	96,69
		n4	95,55	98,40
		n5	94,03	96,85
		n6	97,54	100,04
Segundo trecho (15–30cm)	Segundo trecho (15–30 cm)	n7	96,31	98,49
		n8	95,83	97,71
		n9	99,76	101,44
		n10	96,88	101,02
		n11	97,23	101,28
		n12	95,62	98,47
		n13	97,40	99,97
		n14	97,77	97,71
Terceiro trecho (30–45cm)		n15	96,28	100,31
		n16	97,87	101,52
	Terceiro trecho (30–45cm)	n17	98,60	101,25
		n18	97,88	100,34
		n19	96,47	101,45
		n20	101,53	102,77
		n21	99,64	101,77
		n22	98,33	101,91
		n23	100,69	101,89
		n24	98,61	100,03
		n25	101,80	101,05
		n26		99,56
		n27		100,41

Quadro 6.3: Quadro resumo dos valores medidos directamente nos furos F1 e F2 à profundidade de dois metros

Profundidade 2m								
Trechos do furo		Pancada	Força (kN)		Velocidade (m/s)		Penetração definitiva (DFN) (mm))	
F1	F2		F1	F2	F1	F2	F1	F2
Primeiro trecho (0–15cm)	Primeiro trecho (0–15cm)	n1	79,10	89,67	4,41	4,96	21,84	29,33
		n2	105,04	104,36	5,78	5,78	25,54	31,48
		n3	107,72	108,51	5,67	5,65	23,48	28,22
		n4	101,72	105,51	5,66	5,56	24,39	26,03
		n5	106,83	108,51	5,44	5,52	22,81	25,76
		n6	107,14	104,41	5,33	5,48	23,90	28,43
		n7	100,56	107,77	5,38	5,43	20,69	25,79
Segundo trecho (15–30cm)	Segundo trecho (15–30cm)	n8	102,30	110,51	5,37	5,44	21,47	24,62
		n9	105,78	106,14	5,11	5,36	22,99	24,54
		n10	106,36	109,04	5,39	5,27	22,27	21,28
		n11	106,04	108,35	5,25	5,32	20,09	22,40
		n12	103,34	105,09	5,35	5,21	21,73	21,42
		n13	105,04	108,61	5,16	5,24	22,04	21,19
		n14	101,87	109,88	5,04	5,01	19,73	15,82
		n15	105,83	109,67	4,85	4,94	18,53	20,62
		n16	105,25	108,14	4,75	4,93	19,92	19,37
		n17	101,55	110,46	4,76	4,93	17,39	17,54
Terceiro trecho (30–45cm)	Terceiro trecho (30–45cm)	n18	104,93	109,09	4,76	4,95	17,21	17,66
		n19	105,88	107,46	4,84	4,97	17,39	18,40
		n20	107,57	108,98	4,77	4,86	16,91	17,69
		n21	101,83	111,77	4,76	4,90	15,37	18,85
		n22	106,83	107,45	4,80	5,00	16,27	18,93
		n23	106,67	111,51	4,80	4,96	15,88	23,44
		n24	103,56	107,14	4,84	5,00	14,26	16,23
		n25	106,09	111,24	4,84	4,92	15,05	7,90
		n26	102,66	108,03	4,84	5,01	13,92	11,40
		n27	105,62	109,93	4,70	4,94	14,41	15,82
		n28	105,25	110,46	4,79	4,99	15,27	11,90
		n29	101,93	109,61	4,81	5,00	16,29	15,34
		n30	107,04		4,77		14,36	
		n31	107,25		4,81		14,10	

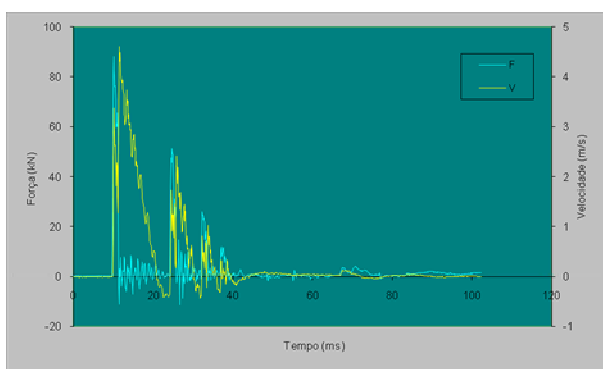
Quadro 6.4: Quadro resumo dos valores da eficácia para cada pancada dos furos F1 e F2, a dois metros de profundidade

Profundidade 2m				
Trechos do furo		Pancada	Eficácia (%)	
F1	F2		F1	F2
Primeiro trecho (0–15cm)	Primeiro trecho (0–15cm)	n1	57,42	66,98
		n2	95,18	106,49
		n3	99,60	105,61
		n4	96,26	102,97
		n5	100,69	105,12
		n6	99,36	104,19
		n7	99,38	104,33
Segundo trecho (15–30cm)	Segundo trecho (15–30cm)	n8	96,15	106,70
		n9	100,24	103,74
		n10	96,98	104,68
		n11	99,24	105,66
		n12	98,12	103,36
		n13	101,68	105,28
		n14	98,30	102,05
		n15	99,17	105,77
		n16	97,43	104,61
		n17	98,64	102,02
Terceiro trecho (30–45cm)	Terceiro trecho (30–45cm)	n18	98,20	104,86
		n19	100,71	103,44
		n20	101,58	104,90
		n21	95,48	105,18
		n22	99,31	106,26
		n23	99,54	105,99
		n24	98,72	105,12
		n25	98,51	104,43
		n26	99,33	105,87
		n27	96,47	104,00
		n28	101,50	105,81
		n29	98,60	104,95
		n30	99,12	
		n31	99,64	

Profundidade: 1m

Número da pancada: n1

Furo F1



Furo F2

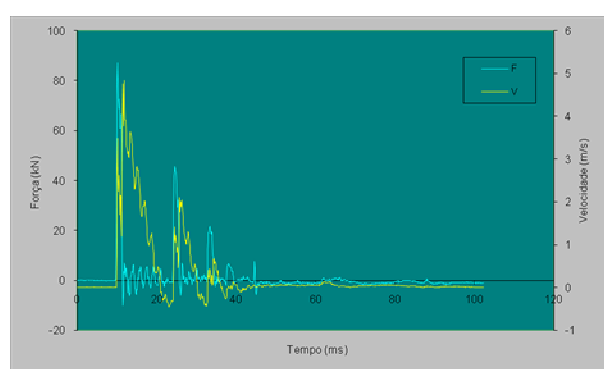


Figura 6.1: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade para n=1

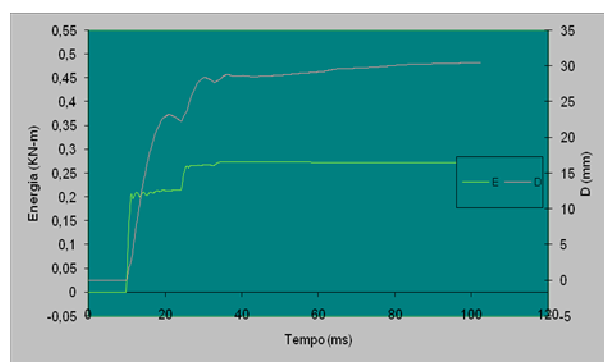
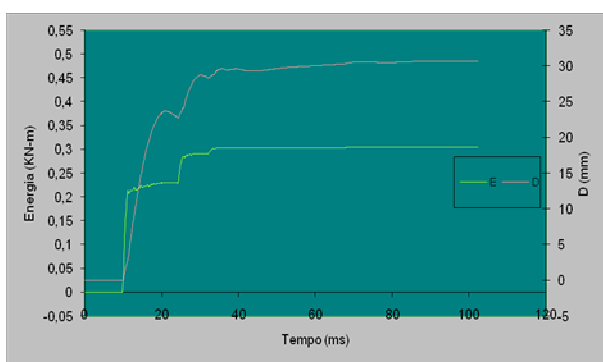


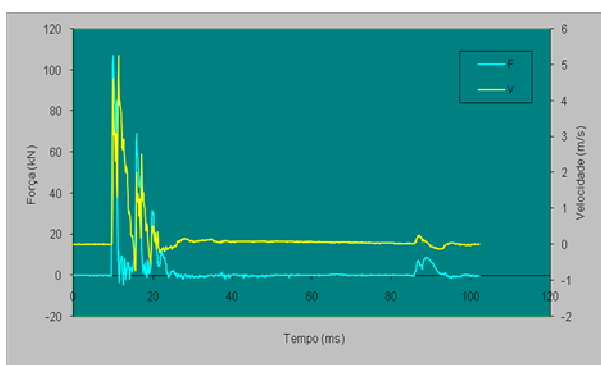
Figura 6.2: Gráficos Tempo vs Deslocamento e Tempo vs Energia EFV para n=1



Profundidade: 1m

Número da pancada: n25 e n27 (respectivamente)

Furo F1



Furo F2

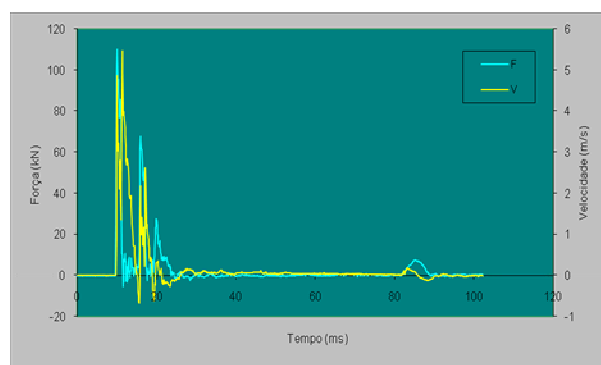


Figura 6.3: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade para n=25 e n=27, respectivamente

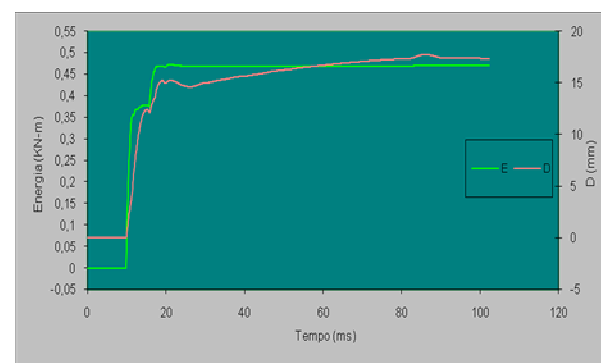
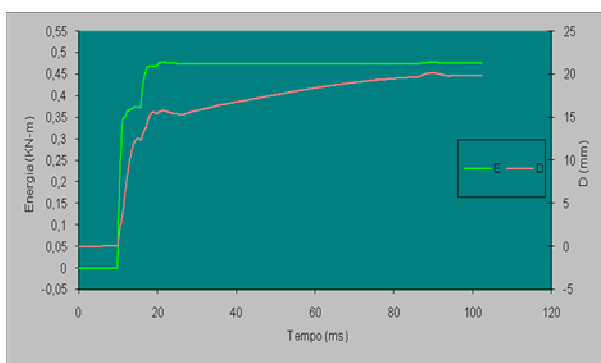
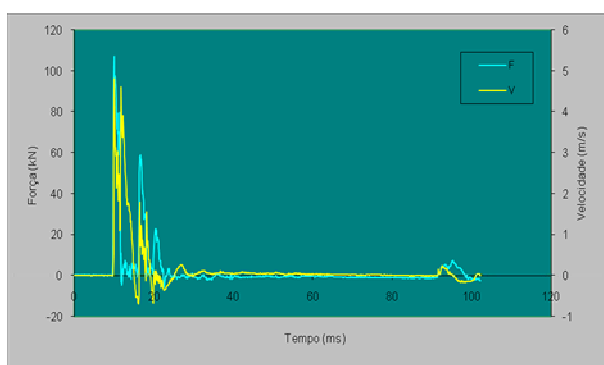


Figura 6.4: Gráficos Tempo vs Deslocamento e Tempo vs Energia EFV para n=25 e n=27, respectivamente

Profundidade: 2m

Número da pancada: n1

Furo F1



Furo F2

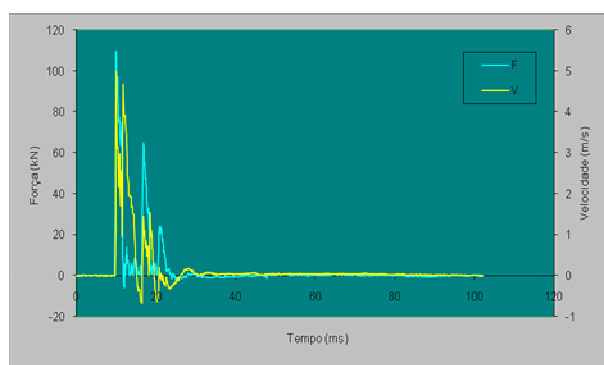


Figura 6.5: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade para n=1

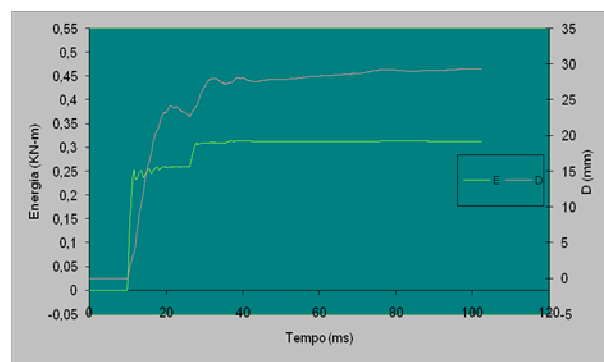
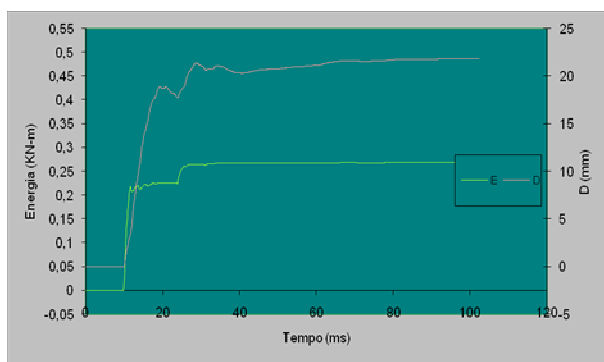


Figura 6.6: Gráficos Tempo vs Deslocamento e Tempo vs Energia EFV para n=1

Profundidade: 2m

Número da pancada: n31 e n29 (respectivamente)

Furo F1

Furo F2

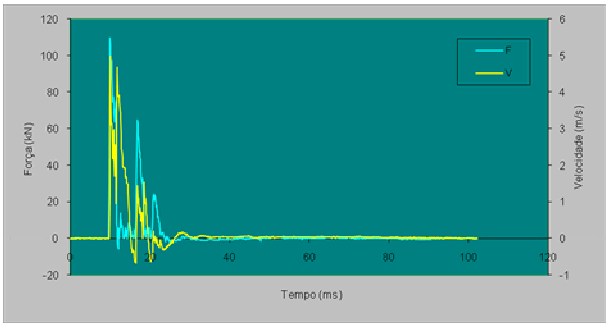
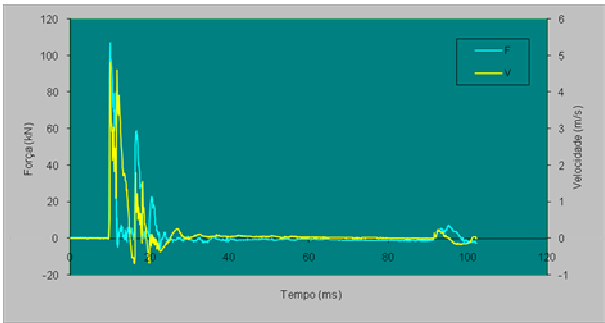


Figura 6.7: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade para n=31 e n=29, respectivamente

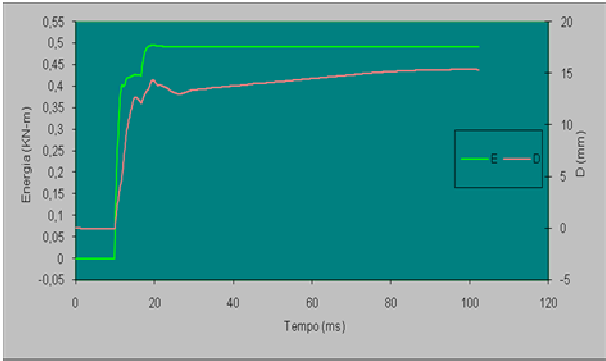
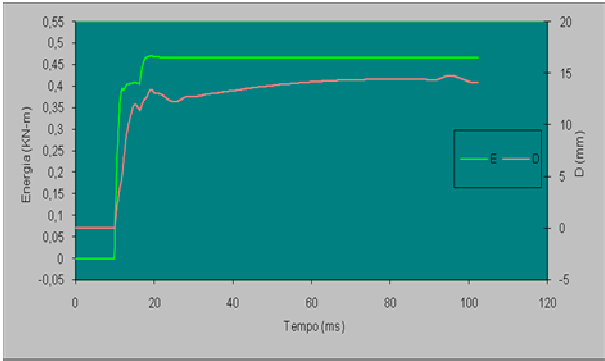


Figura 6.8: Gráficos Tempo vs Deslocamento e Tempo vs Energia EFV para n=31 e n=29, respectivamente

No Quadro 6.5 apresenta-se os valores das medições da frequência do martelo nos furos F1 e F2

Quadro 6.5: Quadro resumo dos valores das medições da frequência de queda do martelo nos furos F1 e F2

	Furo	
	F1	F2 <sup>(1)</sup>
Ritmo	Lento	Elevado
Frequência de queda por minuto	16,9 pancadas	19,5 pancadas
		18,8 pancadas

<sup>(1)</sup> No furo F2 realizaram-se duas medições da frequência de queda do martelo

### 6.3. Furos F1 e F3

Nos Quadros 6.6 a 6.9 apresenta-se um resumo com os valores da força, velocidade e penetração definitiva do amostrador (DFN) por pancada, para as profundidades de 1 e 2m, assim como o cálculo da eficácia. Os registos gráficos são evidenciados nas Figuras 6.9 a 6.16.

Quadro 6.6: Quadro resumo dos valores medidos directamente nos furos F1 e F3 à profundidade de um metro

Profundidade 1m								
Trechos do furo		Pancada	Força (kN)		Velocidade (m/s)		Penetração definitiva (DFN) (mm))	
F1	F3		F1	F3	F1	F3	F1	F3
Primeiro trecho (0–15cm)		n1	88,25	89,56	4,62	4,38	30,73	31,43
		n2	107,61	108,03	5,51	5,61	32,59	45,79
		n3	105,67	106,29	5,38	5,55	31,59	41,03
		n4	106,66	106,24	5,54	5,46	28,92	32,96
		n5	106,56	107,35	5,51	5,35	24,99	30,65
		n6	106,88	108,51	5,48	5,43	25,88	27,97
Segundo trecho (15–30cm)		n7	106,93	107,56	5,51	5,18	26,97	23,35
		n8	105,88	106,87	5,58	5,10	25,88	17,82
		n9	108,51	107,03	5,25	5,17	25,63	25,94
		n10	106,51	107,45	4,62	4,96	21,89	25,82
		n11	107,30	105,45	5,47	4,95	23,68	18,19
		n12	107,35	107,24	5,56	4,99	24,57	22,37
		n13	107,67	104,40	5,57	4,84	22,60	18,22
		n14	107,83	107,40	5,50	4,83	22,78	21,53
Terceiro trecho (30–45cm)		n15	107,72	107,87	5,53	4,87	20,57	20,66
		n16	108,40	105,61	5,40	4,93	20,46	20,42
		n17	107,56	104,61	5,40	4,73	20,71	19,14
		n18	106,40	107,55	5,41	4,79	18,18	22,78
		n19	107,77	107,40	5,31	4,80	18,22	19,67
		n20	103,13	108,35	5,18	4,80	19,83	19,73
		n21	107,40	107,71	4,96	4,82	19,47	14,72
		n22	104,30	105,41	5,18	4,77	18,82	24,97
		n23	104,88	103,77	5,15	4,73	20,48	16,35
		n24	108,41	104,14	5,13	4,77	19,80	22,34
		n25	107,35	106,41	5,27	4,76	19,88	22,83

Quadro 6.7: Quadro resumo dos valores da eficácia para cada pancada dos furos F1 e F3, a um metro de profundidade

Profundidade 1m				
Trechos do furo		Pancada	Eficácia (%)	
F1	F3		F1	F3
Primeiro trecho (0–15cm)		n1	65,13	66,43
		n2	97,99	105,68
		n3	96,25	103,95
		n4	95,55	98,80
		n5	94,03	98,26
		n6	97,54	97,85
Segundo trecho (15–30cm)		n7	96,31	94,31
		n8	95,83	89,74
		n9	99,76	100,27
		n10	96,88	100,50
		n11	97,23	91,98
		n12	95,62	101,15
		n13	97,40	97,21
		n14	97,77	100,10
Terceiro trecho (30–45cm)		n15	96,28	100,89
		n16	97,87	98,99
		n17	98,60	98,43
		n18	97,88	99,08
		n19	96,47	98,96
		n20	101,53	99,63
		n21	99,64	98,38
		n22	98,33	101,56
		n23	100,69	99,87
		n24	98,61	102,38
		n25	101,80	101,26

Quadro 6.8: Quadro resumo dos valores medidos directamente nos furos F1 e F3 à profundidade de dois metros

Profundidade 2m								
Trechos do furo		Pancada	Força (kN)		Velocidade (m/s)		Penetração definitiva (DFN) (mm))	
F1	F3		F1	F3	F1	F3	F3	F3
Primeiro trecho (0–15cm)	Primeiro trecho (0–15cm)	n1	79,10	87,46	4,41	5,16	21,84	36,03
		n2	105,04	104,46	5,78	5,82	25,54	39,19
		n3	107,72	104,40	5,67	5,47	23,48	31,36
		n4	101,72	102,77	5,66	5,49	24,39	27,32
		n5	106,83	102,35	5,44	5,49	22,81	31,28
		n6	107,14	105,35	5,33	5,38	23,90	29,79
Segundo trecho (15–30cm)	Segundo trecho (15–30cm)	n7	100,56	107,14	5,38	5,28	20,69	29,82
		n8	102,30	103,56	5,37	5,29	21,47	28,50
		n9	105,78	102,87	5,11	5,03	22,99	26,57
		n10	106,36	105,04	5,39	4,87	22,27	23,21
		n11	106,04	103,61	5,25	4,73	20,09	21,46
		n12	103,34	107,82	5,35	4,72	21,73	18,53
		n13	105,04	108,04	5,16	4,66	22,04	17,52
		n14	101,87	106,88	5,04	4,63	19,73	21,61
Terceiro trecho (30–45cm)	Terceiro trecho (30–45cm)	n15	105,83	106,93	4,85	4,71	18,53	22,02
		n16	105,25	105,72	4,75	4,87	19,92	18,49
		n17	101,55	104,61	4,76	4,80	17,39	18,78
		n18	104,93	104,25	4,76	4,87	17,21	19,33
		n19	105,88	104,46	4,84	4,89	17,39	19,38
		n20	107,57	107,09	4,77	4,74	16,91	19,50
		n21	101,83	107,46	4,76	4,71	15,37	21,17
		n22	106,83	106,09	4,80	4,75	16,27	22,29
		n23	106,67	105,88	4,80	4,71	15,88	19,22
		n24	103,56	106,77	4,84	4,59	14,26	16,23
		n25	106,09	108,82	4,84	4,75	15,05	17,78
		n26	102,66	105,77	4,84	4,68	13,92	17,06
		n27	105,62		4,70		14,41	
		n28	105,25		4,79		15,27	
		n29	101,93		4,81		16,29	
		n30	107,04		4,77		14,36	
		n31	107,25		4,81		14,10	

Quadro 6.9: Quadro resumo dos valores da eficácia para cada pancada dos furos F1 e F3, a dois metros de profundidade

Profundidade 2m				
Trechos do furo		Pancada	Força (kN)	
F1	F3		F1	F3
Primeiro trecho (0–15cm)	Primeiro trecho (0–15cm)	n1	57,42	65,57
		n2	95,18	96,17
		n3	99,60	96,80
		n4	96,26	93,87
		n5	100,69	98,81
		n6	99,36	96,01
Segundo trecho (15–30cm)	Segundo trecho (15–30cm)	n7	99,38	99,19
		n8	96,15	103,06
		n9	100,24	97,40
		n10	96,98	100,25
		n11	99,24	94,60
		n12	98,12	96,10
		n13	101,68	97,13
		n14	98,30	101,97
Terceiro trecho (30–45cm)	Terceiro trecho (30–45cm)	n15	99,17	99,55
		n16	97,43	97,84
		n17	98,64	97,65
		n18	98,20	100,18
		n19	100,71	99,20
		n20	101,58	100,46
		n21	95,48	99,95
		n22	99,31	102,06
		n23	99,54	98,61
		n24	98,72	96,57
		n25	98,51	98,12
		n26	99,33	99,86
		n27	96,47	
		n28	101,50	
		n29	98,60	
		n30	99,12	
		n31	99,64	



Profundidade: 1m

Número da pancada: n1

Furo F1

Furo F3

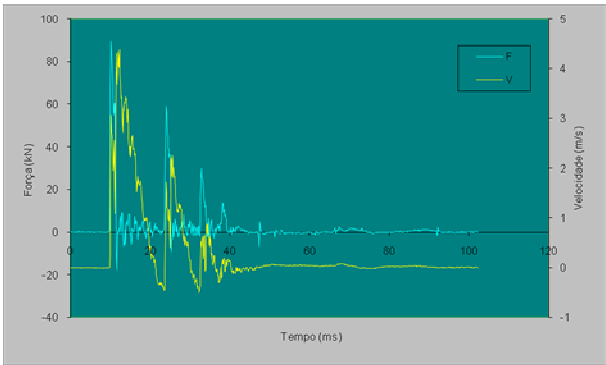
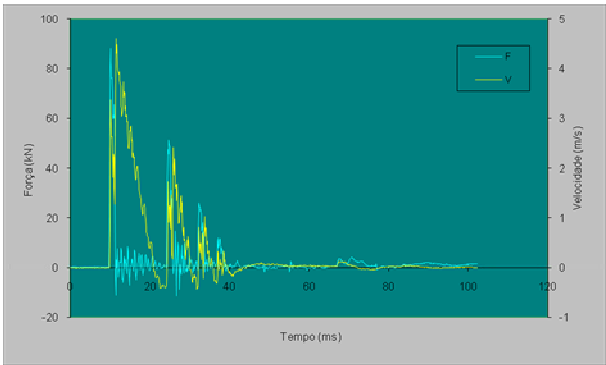


Figura 6.9: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade para n=1

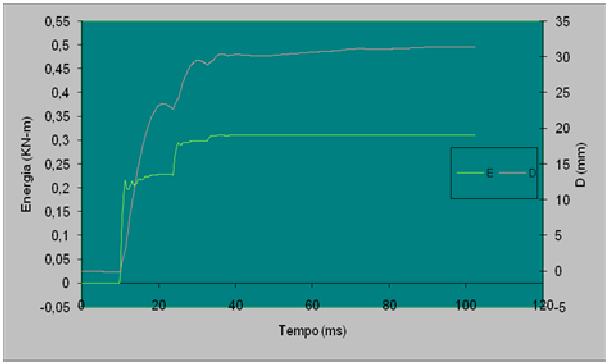
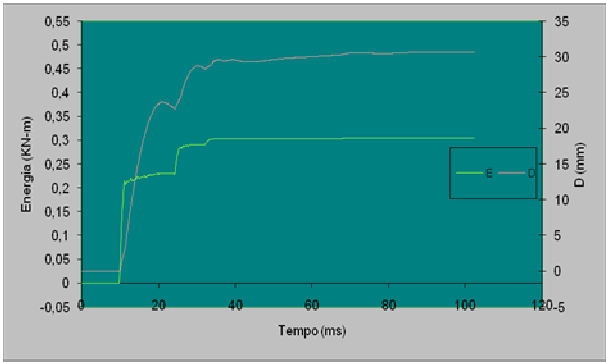
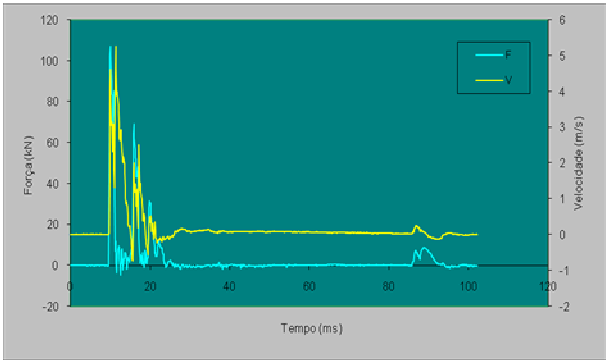


Figura 6.10: Gráficos Tempo vs Deslocamento e Tempo vs Energia EFV para n=1

Profundidade: 1m

Número da pancada: n25

Furo F1



Furo F3

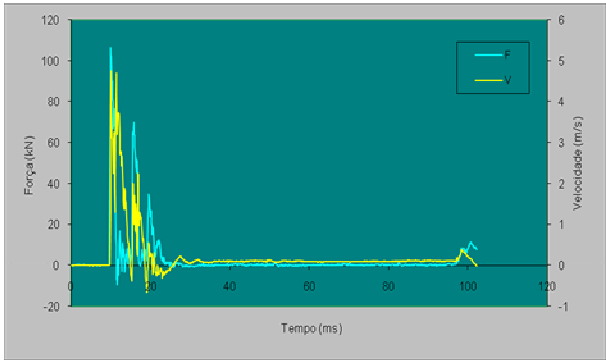


Figura 6.11: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade para n=25

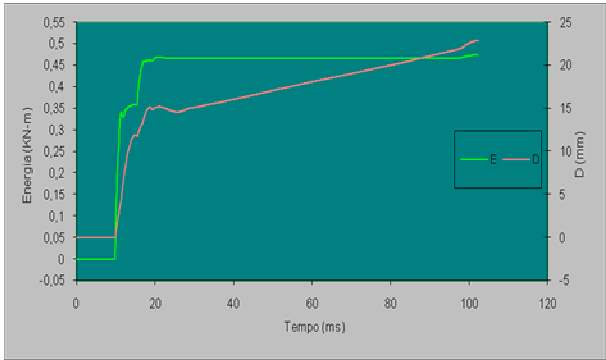
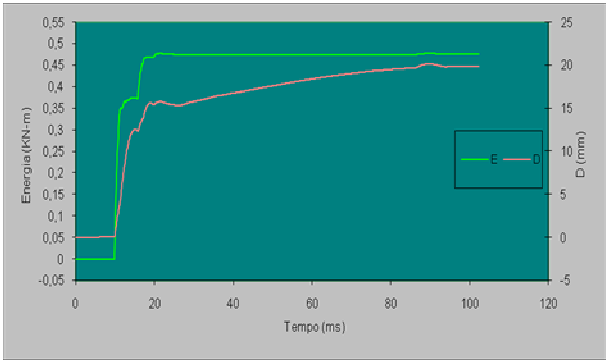
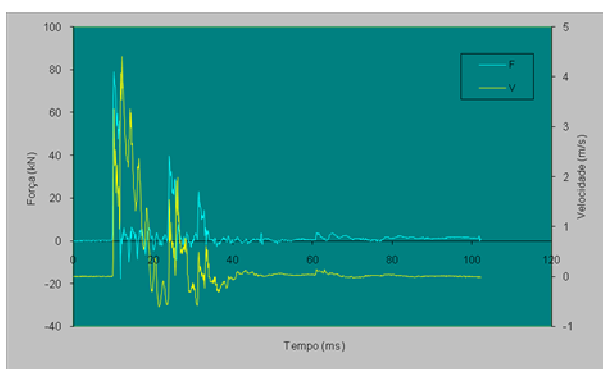


Figura 6.12: Gráficos Tempo vs Deslocamento e Tempo vs Energia EFV para n=25

Profundidade: 2m

Número da pancada: n1

Furo F1



Furo F3

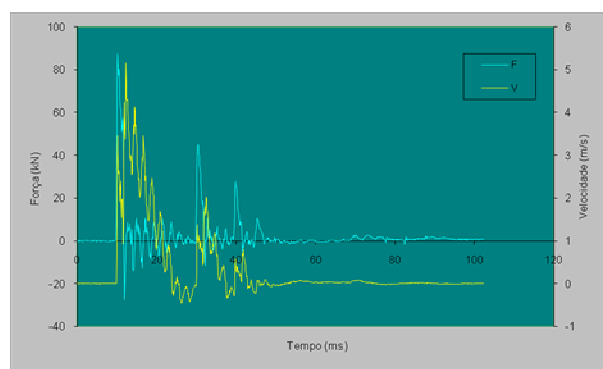


Figura 6.13: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade para n=1

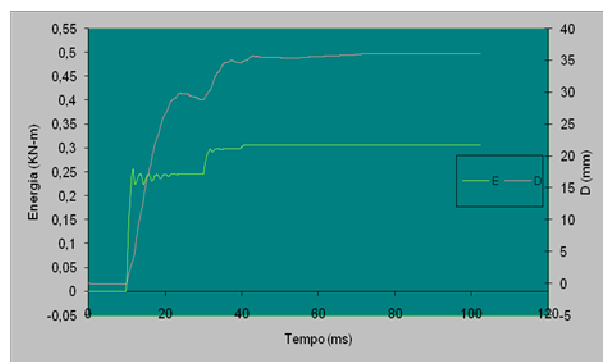
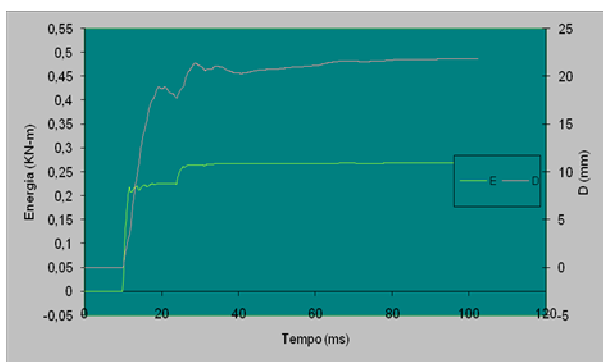
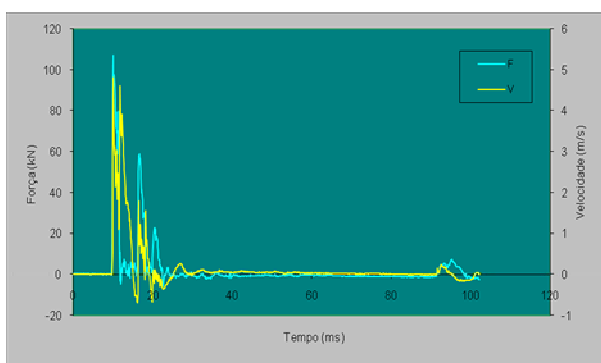


Figura 6.14: Gráficos Tempo vs Deslocamento e Tempo vs Energia EFV para n=1

Profundidade: 2m

Número da pancada: n31 e n26 (respectivamente)

Furo F1



Furo F3

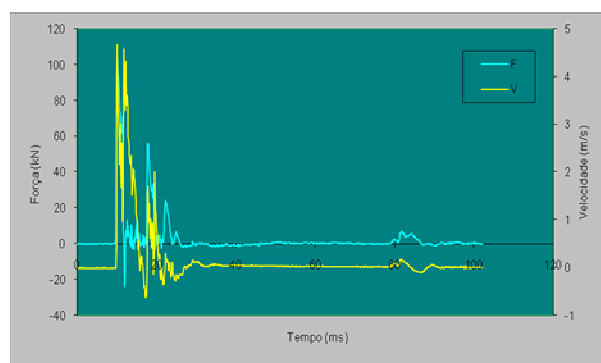


Figura 6.15: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade para n=31 e n=26, respectivamente

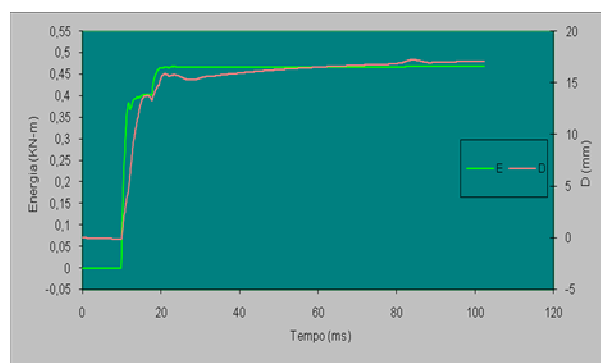
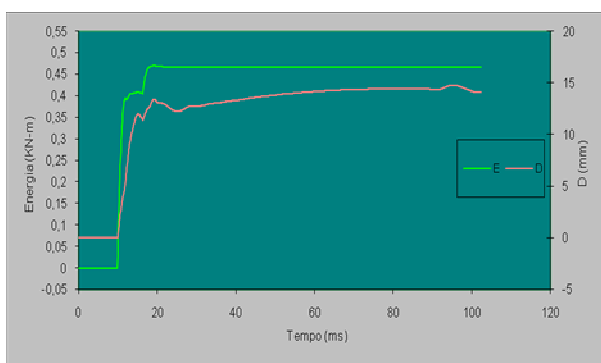


Figura 6.16: Gráficos Tempo vs Deslocamento e Tempo vs Energia EFV para n=31 e n=26, respectivamente

Os valores das medições da frequência e da altura de queda do martelo encontram-se por sua vez representados no Quadros 6.10 e 6.11, respectivamente.

Quadro 6.10: Quadro resumo dos valores das medições da frequência de queda do martelo nos furos F1 e F3

	Furo	
	F1	F3
Ritmo	Lento	Lento
Frequência de queda por minuto	16,9 pancadas	16,6 pancadas

Quadro 6.11: Quadro resumo dos valores das medições da altura de queda do martelo nos furos F1 e F3

	Furo	
	F1	F3
Altura de queda do martelo <sup>(2)</sup>	76,5 cm	77,5 cm

<sup>(2)</sup> Medida pelo método anteriormente referenciado

## 6.4. Valores médios

Para uma melhor percepção dos valores obtidos, apresentam-se nos Quadros 6.12 à 6.17, os respectivos valores médios.

Quadro 6.12: Quadro resumo dos valores médios obtidos no furo F1 à profundidade de um metro

<b>Furo: F1</b> <b>Profundidade: 1 m</b>					
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Média do primeiro trecho de 15 cm	103,61	5,34	29,12	174,71	91,08
Média dos últimos trechos de 15 cm	106,91	5,32	21,81	194,00	98,10
Média dos três trechos de 15 cm	106,12	5,32	23,40	216,40	96,44

Quadro 6.13: Quadro resumo dos valores médios obtidos no furo F1 à profundidade de dois metros

<b>Furo: F1</b> <b>Profundidade: 2 m</b>					
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Média do primeiro trecho de 15 cm	101,30	5,38	23,01	184,11	93,00
Média dos últimos trechos de 15 cm	104,96	4,90	17,45	201,91	98,98
Média dos três trechos de 15 cm	104,74	5,10	19,57	199,48	98,71

Quadro 6.14: Quadro resumo dos valores médios obtidos no furo F2 à profundidade de um metro

<b>Furo: F2</b> <b>Profundidade: 1 m</b>					
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Média do primeiro trecho de 15 cm	110,20	5,52	21,23	189,96	99,98
Média dos últimos trechos de 15 cm	108,59	5,35	18,36	210,67	100,86
Média dos três trechos de 15 cm	109,07	5,40	19,22	198,71	100,59

Quadro 6.15: Quadro resumo dos valores médios obtidos no furo F2 à profundidade de dois metros

<b>Furo: F2</b> <b>Profundidade: 2 m</b>					
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Média do primeiro trecho de 15 cm	108,11	5,19	21,04	195,04	104,36
Média dos últimos trechos de 15 cm	109,38	4,95	16,46	208,80	104,82
Média dos três trechos de 15 cm	108,95	5,03	17,99	193,57	104,67

Quadro 6.16: Quadro resumo dos valores médios obtidos no furo F3 à profundidade de um metro

<b>Furo: F3</b> <b>Profundidade: 1 m</b>					
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Média do primeiro trecho de 15 cm	106,41	5,00	21,40	209,85	96,81
Média dos últimos trechos de 15 cm	106,35	4,80	20,43	173,26	99,96
Média dos três trechos de 15 cm	106,37	4,87	20,75	223,64	98,91

Quadro 6.17: Quadro resumo dos valores médios obtidos no furo F3 à profundidade de dois metros

<b>Furo: F3</b> <b>Profundidade: 2 m</b>					
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Média do primeiro trecho de 15 cm	105,16	4,88	22,63	194,95	98,09
Média dos últimos trechos de 15 cm	106,21	4,75	19,45	187,22	99,39
Média dos três trechos de 15 cm	106,01	4,76	20,01	231,25	98,75



## 7. ANÁLISE E CONCLUSÕES DOS RESULTADO

### 7.1. Comparação dos resultados

De modo a facilitar a comparação entre os vários resultados do ensaio segue-se um conjunto de quatro quadros (Quadro 7.1 ao 7.4), os quais apresentam as diferenças (em valor), entre cada dois pares de furos, o par F1, F2 (ritmo lento e elevado respectivamente), e o par F1, F3, (batente estreito e batente largo respectivamente). Para além dos quadros também será apresentado uma comparação entre os gráficos relativos a cada furo (Figuras 7.1 a 7.12).

Quadro 7.1: Quadro resumo das diferenças entre os valores médios de cada parâmetro dos furos F1 e F2, para a profundidade de um metro

	Diferença entre F1 e F2 (F1 – F2)				
	Profundidade: 1 m				
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Primeiro trecho de 15 cm	-2,52	-0,34	-2,38	-14,26	-0,75
Segundo trecho de 15 cm	-2,17	-0,09	2,32	-16,67	-2,39
Terceiro trecho de 15 cm	-2,30	-0,15	1,24	17,69	-2,13

Quadro 7.2: Quadro resumo das diferenças entre os valores médios de cada parâmetro dos furos F1 e F2, para a profundidade de dois metros

Diferença entre F1 e F2 (F1 – F2)					
Profundidade: 2 m					
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Primeiro trecho de 15 cm	-2,80	-0,10	-4,85	-10,93	-6,38
Segundo trecho de 15 cm	-4,06	-0,15	-0,84	-6,89	-5,78
Terceiro trecho de 15 cm	-3,10	-0,05	-1,03	5,91	-4,75

Quadro 7.3: Quadro resumo das diferenças entre os valores médios de cada parâmetro dos furos F1 e F3, para a profundidade de um metro

Diferença entre F1 e F3 (F1 – F3)					
Profundidade: 1 m					
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Primeiro trecho de 15 cm	-0,73	0,04	-5,86	-35,14	-4,08
Segundo trecho de 15 cm	0,48	0,44	0,92	20,74	-0,57
Terceiro trecho de 15 cm	0,19	0,34	-0,87	-7,24	-1,39

Quadro 7.4: Quadro resumo das diferenças entre os valores médios de cada parâmetro dos furos F1 e F3, para a profundidade de dois metros

Diferença entre F1 e F3 (F1 – F3)					
Profundidade: 2 m					
	Força (kN)	Velocidade (m/s)	DFN (mm)		Eficácia (%)
			Média	Penetração total	
Primeiro trecho de 15 cm	0,17	-0,09	-9,48	-10,85	1,80
Segundo trecho de 15 cm	-0,98	0,09	-3,47	14,68	-0,01
Terceiro trecho de 15 cm	-0,79	0,14	-3,53	-31,77	0,26

## Furo F1

Número da pancada: n1

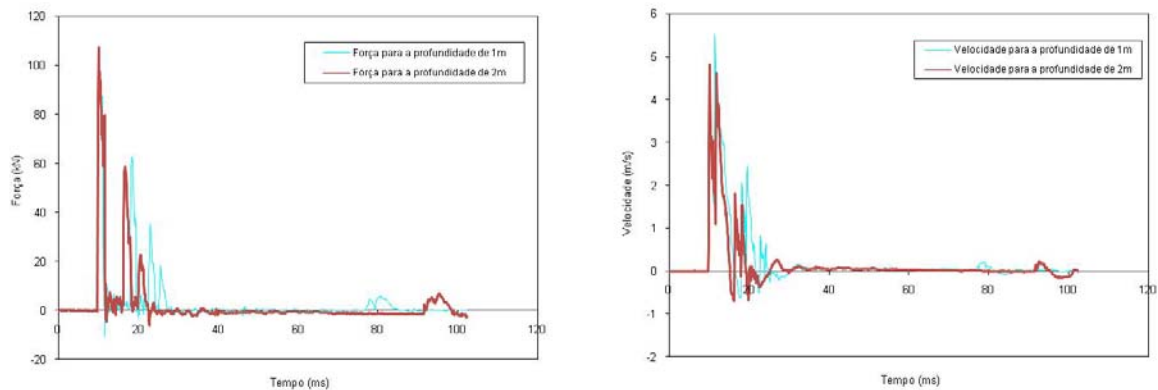


Figura 7.1: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade da primeira pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F1

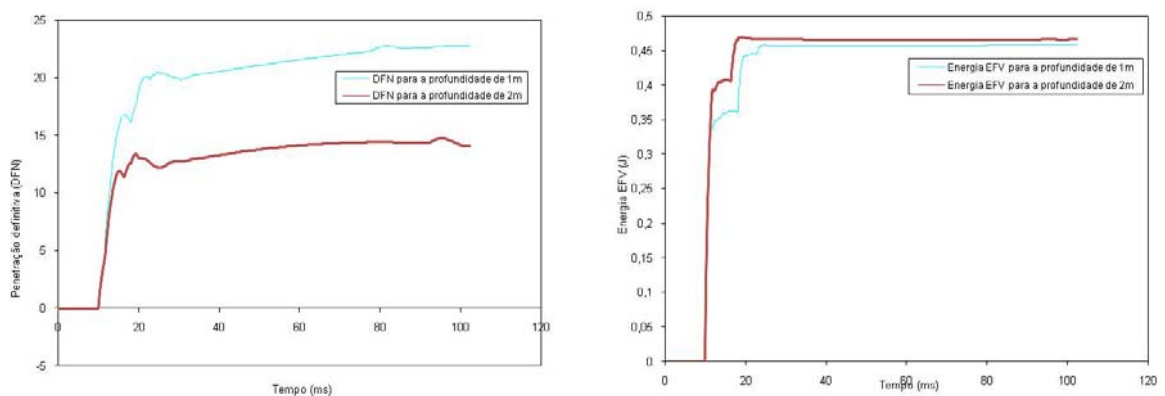


Figura 7.2: Gráficos Tempo vs Penetração definitiva e Tempo vs Energia EVF da primeira pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F1

## Furo F1

Número da pancada: n25 e n31, respectivamente

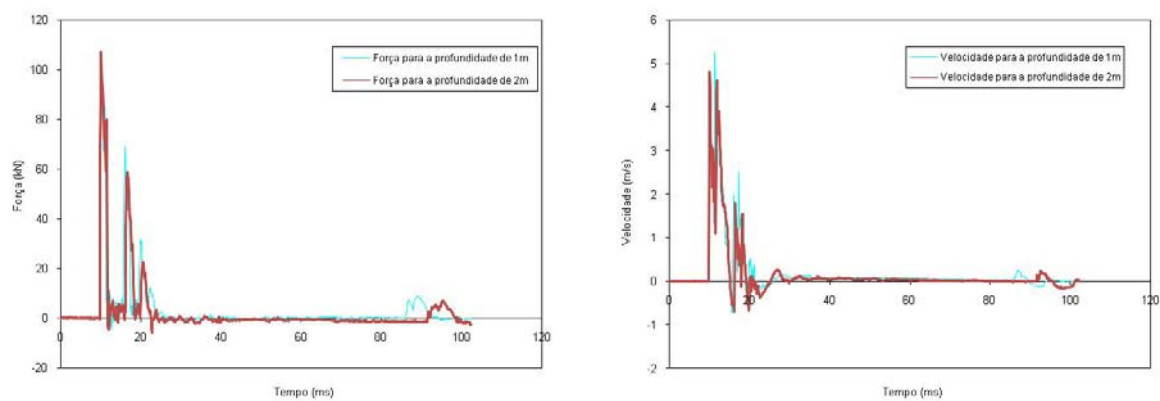


Figura 7.3: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade da última pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F1

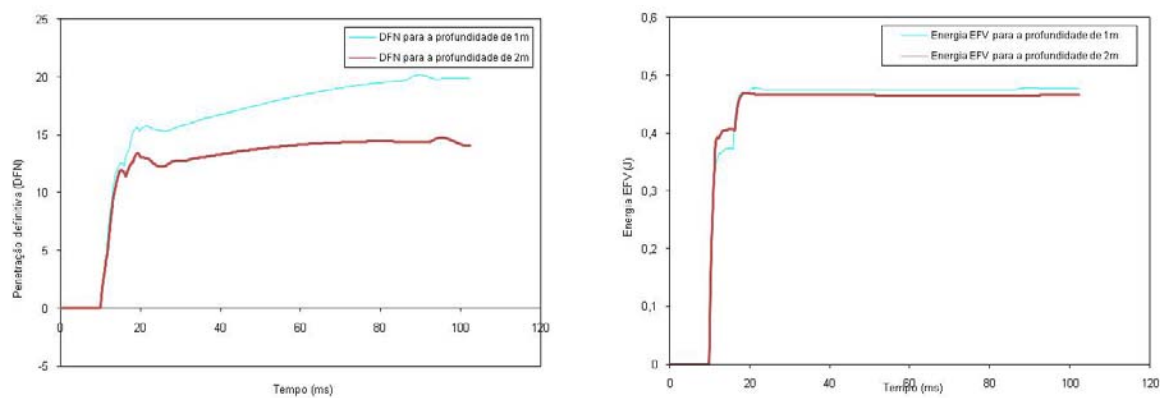


Figura 7.4: Gráficos Tempo vs Penetração definitiva e Tempo vs Energia EVF da última pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F1

## Furo F2

Número da pancada: n1

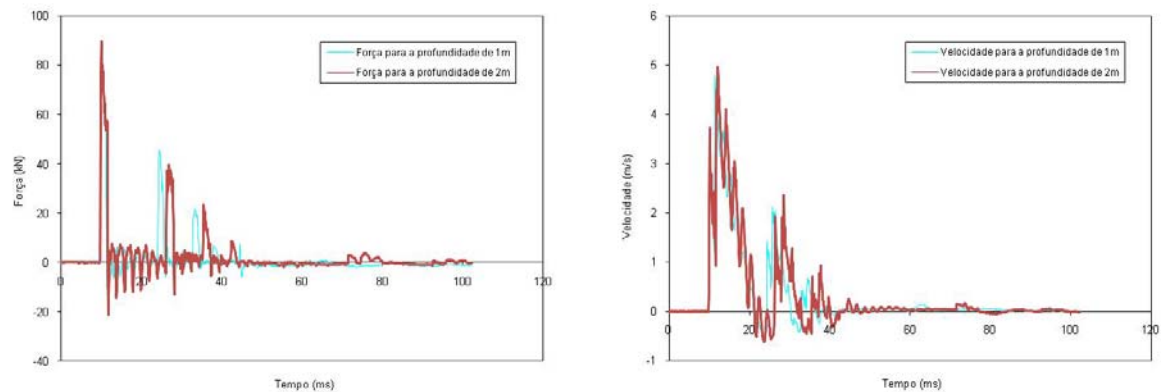


Figura 7.5: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade da primeira pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F2

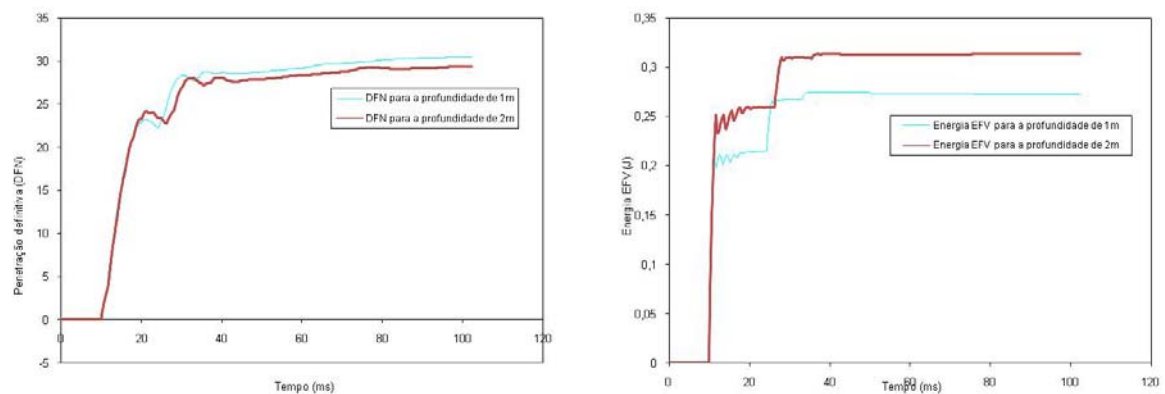


Figura 7.6: Gráficos Tempo vs Penetração definitiva e Tempo vs Energia EVF da primeira pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F2

## Furo F2

Número da pancada: n27 e n29, respectivamente

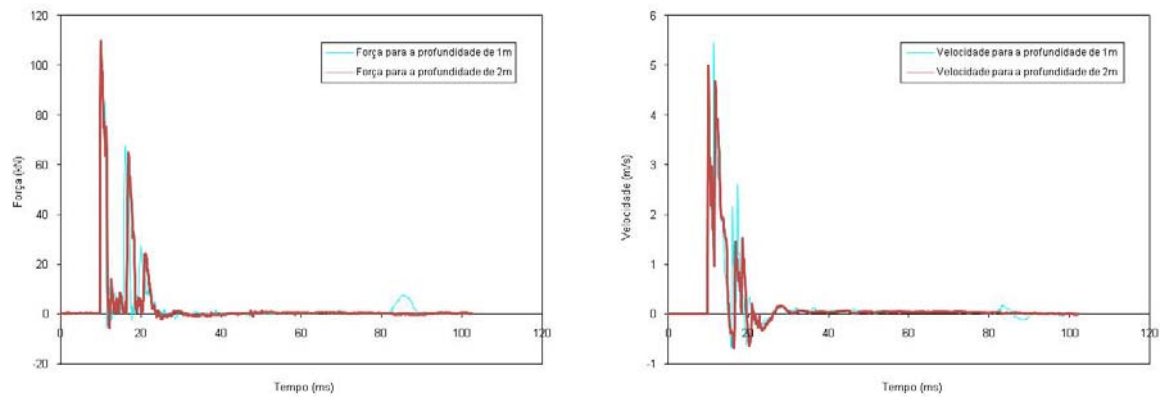


Figura 7.7: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade da última pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F2

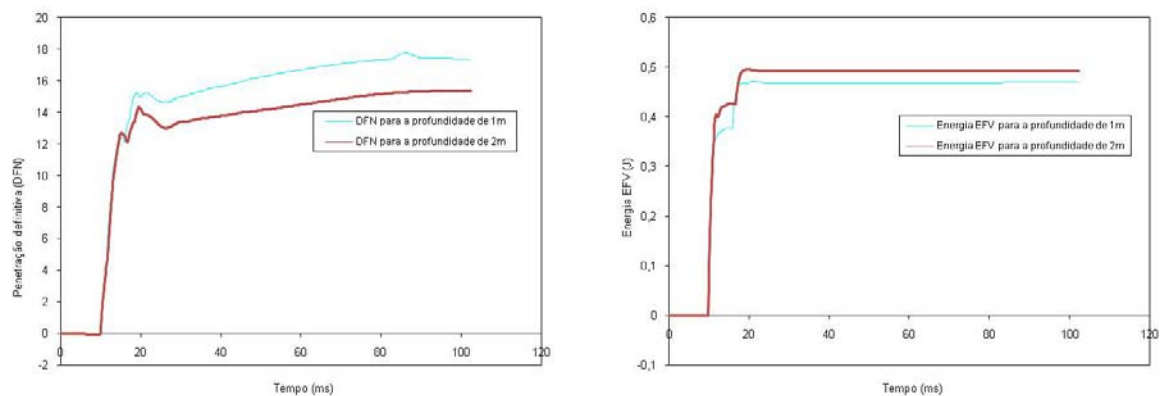


Figura 7.8: Gráficos Tempo vs Penetração definitiva e Tempo vs Energia EVF da última pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F2

## Furo F3

Número da pancada: n1

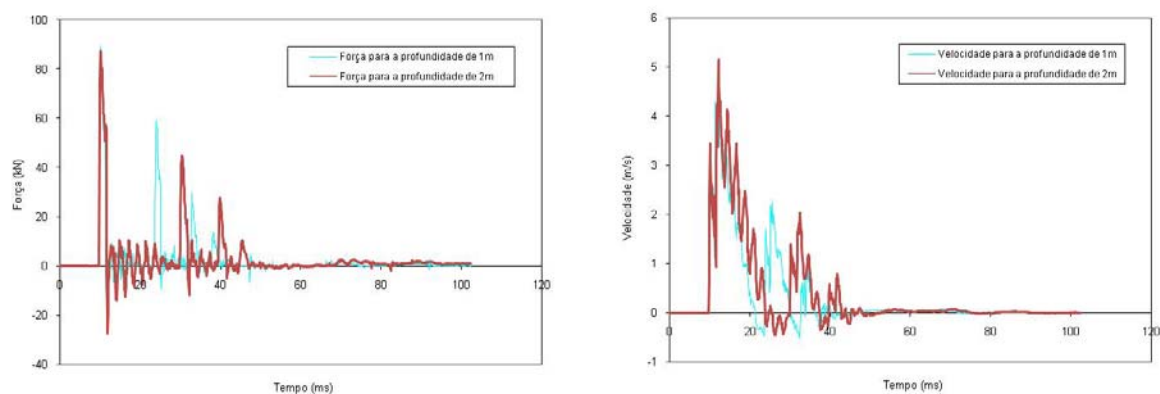


Figura 7.9: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade da primeira pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F3

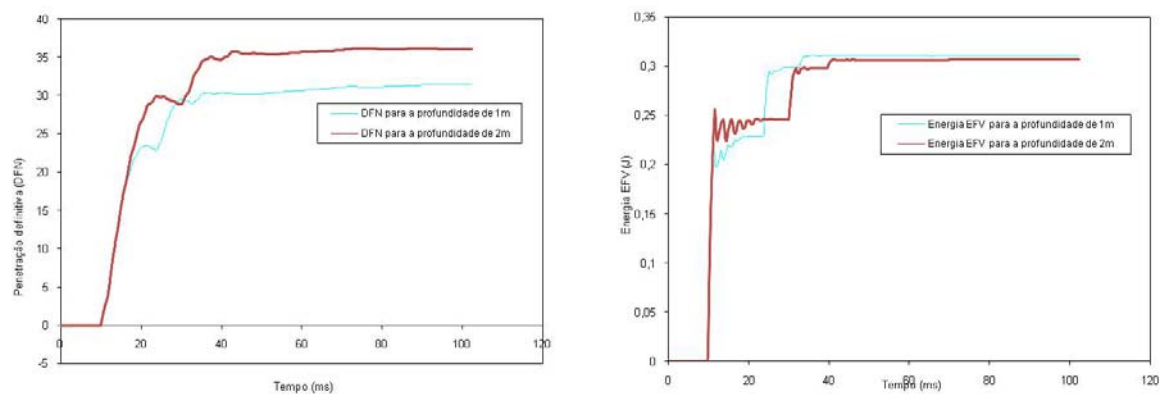


Figura 7.10: Gráficos Tempo vs Penetração definitiva e Tempo vs Energia EVF da primeira pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F2



## Furo F3

Número da pancada: n25 e n26, respectivamente

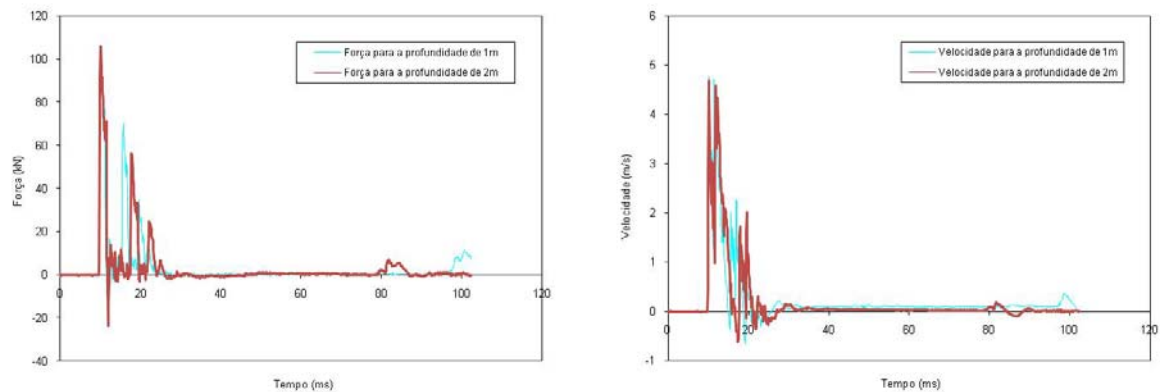


Figura 7.11: Gráficos Tempo vs Força e Tempo vs Velocidade da última pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F3

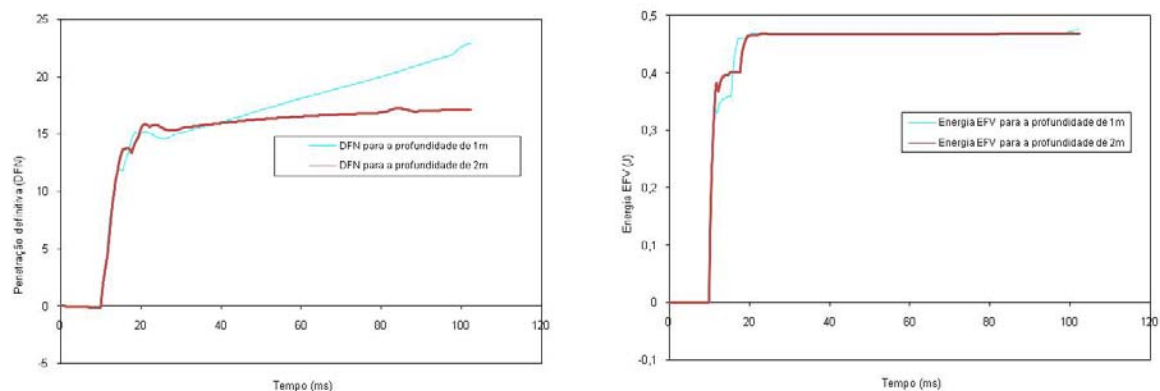


Figura 7.12: Gráficos Tempo vs Penetração definitiva e Tempo vs Energia EVF da última pancada das campanhas realizadas a um e dois metros de profundidade no furo F3

## 7.2. Análise dos resultados

### 7.2.1. Furos F1 e F2

A análise relativa aos resultados dos furos F1 e F2, indica que:

- a) As duas campanhas realizadas no furo F2 (ritmo elevado) exibem valores superiores aos do furo F1, para todos os parâmetros. O parâmetro maior ênfase é a eficácia, sobretudo nas campanhas realizadas a dois metros de profundidade.
- b) O valor máximo da penetração definitiva ocorreu sempre na segunda pancada, isto nas quatro campanhas. Já o valor mínimo deu-se no último trecho de 15cm, novamente nas quatro campanhas.
- c) A eficácia, apresenta, para a profundidade de um metro, o seu valor máximo no primeiro trecho, enquanto o mínimo ocorre no terceiro, isto em ambos os furos. À profundidade de dois metros, tanto no furo F1 como no F2 o valor máximo da eficácia se apresenta no segundo trecho. Quanto o valor mínimo, este ocorre no primeiro e segundo trecho para os furos F1 e F2, respectivamente.
- d) Por fim, o furo F1 apresenta 3 valores de eficácia superiores à 100% enquanto o F2 apresenta 17, isto para a profundidade de um metro. Para a profundidade de dois metros, o furo F1 apresenta 6 valores enquanto o F2 apresenta 28 em 29 valores superiores à 100%.

### 7.2.2. Furos F1 e F3

Por sua vez, a análise aos resultados dos furos F1 e F3 indica que:

- a) Para a profundidade de 1,0m os valores de DFN e Eficácia apresentam-se ligeiramente superiores no furo F3 do que no furo F1. Para a profundidade de dois metros o furo F3 apresenta valores superiores do que no F1 nos registos de força e DFN.

- b) Por sua vez, o furo F1 possui valores de força e velocidade superiores ao F3 para a profundidade de um metro. Já a dois metros, F1 é superior na velocidade e eficácia.

É importante salientar que estas superioridades não são muito significativas.

- c) O valor máximo da eficácia, a profundidade de um metro, surgiu no primeiro trecho para ambos os furos, enquanto o valor mínimo ocorreu no terceiro e segundo trecho, para os furos F1 e F3, respectivamente. À profundidade de dois metros, obteve-se o valor máximo no segundo trecho e o mínimo no primeiro, isto em ambos os furos.
- d) Por fim, tal como já referido, o furo F1 apresenta 3 valores de eficácia superiores à 100%, sendo que o furo F3 apresenta 10, para a profundidade de um metro. A dois metros, tanto o furo F1 como o F3 apresentam 6 valores de eficácia superior a 100%.

### **7.2.3. Análise comum às duas partes**

Uma vez que os valores apresentam certas características comuns aos dois pares de furos (F1, F2 e F1, F3), e de modo a não ser repetitivo, apresentam-se de seguida essas características:

- a) Em cada uma das seis campanhas, os valores da primeira pancada apresentam-se significativamente inferiores aos restantes, isto em todos os parâmetros, exceptuando os da penetração definitiva.
- b) Todos os valores registados apresentam boa consistência, sendo os da penetração definitiva aqueles que apresentam uma consistência menor. O Quadro 7.5 ilustra os desvios padrão dos vários parâmetros em cada uma das campanhas.

Quadro 7.5: Quadro resumo dos valores dos desvios padrão de cada parâmetro registado

Furo	F1		F2		F3	
Profundidade	1 m	2 m	1 m	2 m	1 m	2 m
Força (kN)	1,3	2,1	1,6	2,0	1,4	1,8
Velocidade (m/s)	0,17	0,33	0,21	0,27	0,28	0,35
DFN (mm)	4,00	3,62	5,45	5,49	7,41	5,82
Eficácia (%)	1,9	1,7	1,7	1,2	3,4	2,3

De salientar que estes desvios padrão, não incluindo os de DFN, são relativos a todos os registos exceptuando os da primeira pancada, uma vez que estes se apresentam significativamente inferiores aos restantes.

### 7.3. Conclusões

Uma das situações que mais importa esclarecer será provavelmente o facto da primeira pancada apresentar um valor significativamente inferior aos restantes, atingindo percentagens de 42%.

Tal acontecimento deve-se única e simplesmente ao modo de funcionamento do sistema de levantamento e destravamento do martelo. A Figura 7.13 ilustra o sistema de destravamento que funciona com base num sistema de circunferências semi partidas

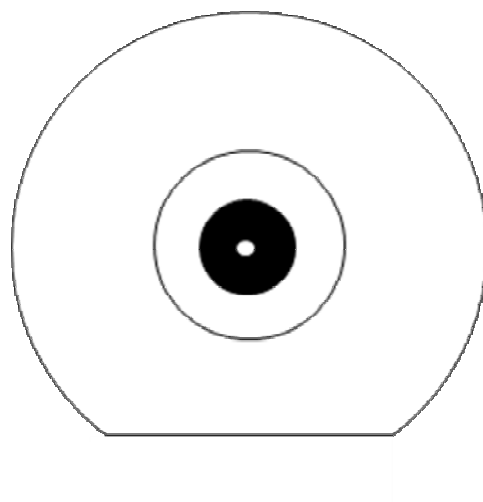


Figura 7.13: Esquema da circunferência semi-partida

Quando esta se encontra com a face partida paralela aos veios hidráulicos do equipamento (Figura 7.14) o martelo é destravado, iniciando o movimento descendente até embater no batente situada no topo do trem de varas.

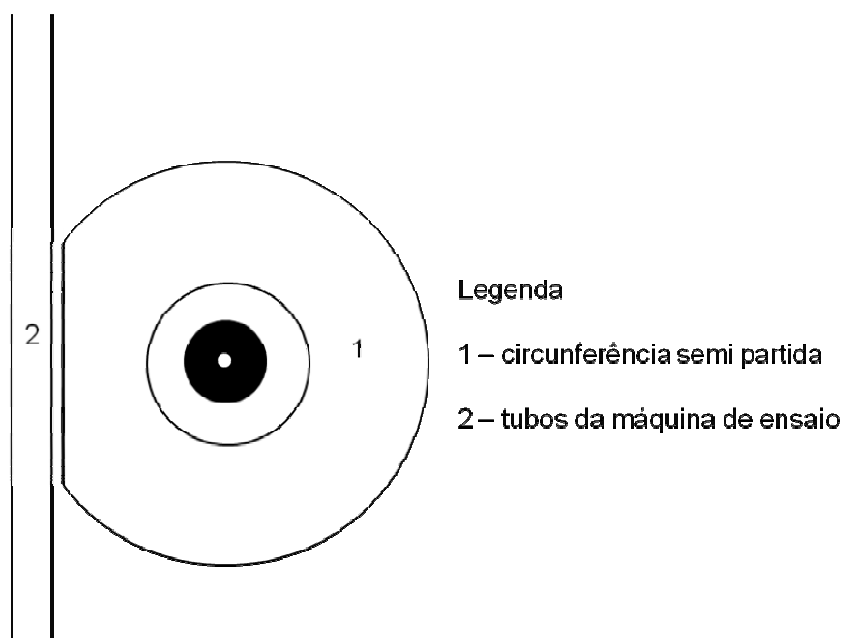


Figura 7.14: Posição correcta da circunferência semi partida aquando da libertação do martelo.

Ora, aquando da primeira pancada a circunferência semi partida poderá não estar com a face partida paralela aos veios hidráulicos do equipamento, que é o mais comum (Figura 7.15), fazendo com que o martelo não seja logo destravado, mas sim ocorrendo o oposto. Por outras palavras, o martelo é travado enquanto a face partida da circunferência não se encontra em posição paralela aos veios hidráulicos do equipamento. Quando tal acontece, o martelo é finalmente libertado caindo livremente sobre o batente, mas a altura de queda nessa situação será inferior à altura de queda das restantes pancadas.

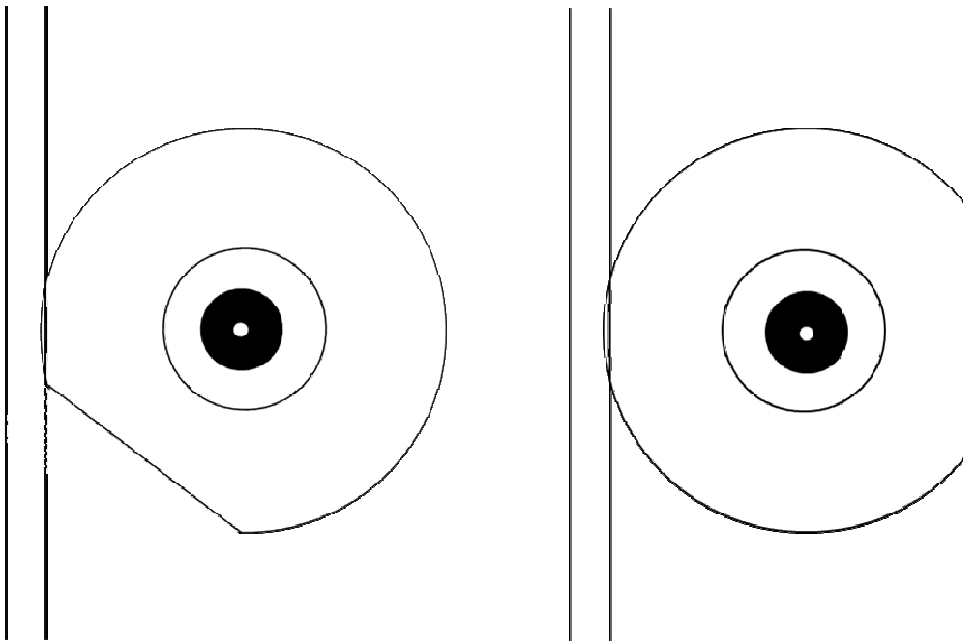


Figura 7.15: Duas das possíveis posições da circunferência semi partida aquando do início da primeira pancada.

De referir, que apesar de tudo, é possível que a circunferência semi partida esteja com a face partida paralela aos veios hidráulicos do equipamento, obtendo-se assim valores de primeira pancada semelhantes aos restantes. No entanto, tal ocorrência é arbitraria não existindo maneira de definir qual a posição da circunferência aquando do início do ensaio. Para além disso, convém também referir que no fim desta, a circunferência toma a posição correcta fazendo com que o martelo seja libertado na posição correcta para as restantes pancadas.

Outros aspectos igualmente importantes que resultam da análise dos valores são discutidos em seguida:

- a) A frequência da queda do martelo influencia os registos da força, velocidade, penetração definitiva e eficácia, já que os valores relativos ao furo F2 (ritmo elevado) apresentam-se mais elevados do que os do furo F1 (ritmo lento).
- b) Quanto ao tipo de batente, não existe um predomínio claro de nenhuma das situações. Os resultados apresentam-se muito semelhantes ao longo das 4 campanhas, com os valores da eficácia de F3 ligeiramente superiores aos de F1 para a profundidade de um metro, ocorrendo exactamente o oposto à profundidade de dois metros.
- c) O facto do valor máximo da penetração definitiva se apresentar sempre na segunda pancada é fruto de dois factores:
  - 1. O primeiro é relativo à descompressão do solo devido a furação, sendo que este se encontra mais aliviado junto à base do furo.
  - 2. O segundo é relativo à altura de queda do martelo na primeira pancada ser inferior às restantes, o que faz com que o valor máximo do DFN seja atingido na segunda pancada e não na primeira.

Estas duas características fazem então com que a segunda pancada apresente o valor máximo de DFN, já que nesta a altura de queda do martelo já é a normal e o solo ainda se encontra ligeiramente aliviado.

- d) A existência de valores de eficácia superiores a 100% indica que houve ganhos de energia ao longo da queda do martelo. Ora tal contradiz as considerações teóricas apresentadas. Tal facto poderá ser explicado segundo duas características distintas:
  - 1. A primeira relativa ao equipamento e características do ensaio, que reside no facto de o equipamento utilizado não estar de acordo com a norma associada ao ensaio (ASTM D1586/58T), nomeadamente, peso do martelo, peso das varas, altura de queda, diâmetro de furo, entre outros, que fazem com que a energia potencial disponível não corresponda ao valor da

energia potencial teórica, e por consequente a eficácia calculada não seja a correcta.

2. A segunda característica prende-se com o modo de execução do ensaio, sobretudo com o ritmo de queda do martelo. Aquando da ocorrência de uma pancada (excepto a primeira) a energia resultante do impacto anterior ainda não se encontra totalmente dissipada, fazendo com que haja uma certa acumulação de energia à medida que o número de pancadas vai aumentando. Quanto maior o ritmo de queda do martelo maior será essa acumulação e por consequente maior o valor da eficácia do sistema. De modo a evitar essa acumulação é necessário introduzir um tempo de espera entre cada pancada. Contudo, este intervalo deverá crescer com a profundidade de ensaio, já que quanto maior a profundidade de ensaio, maior o tempo necessário para que a energia da pancada seja totalmente dissipada, uma vez que o percurso percorrido por esta será maior. Estas são as principais razões pelas quais os valores de eficácia no furo F2 são claramente superiores aos do F1.

De modo a finalizar este capítulo, seguem-se algumas conclusões relativas aos gráficos anteriormente apresentados.

Em primeiro lugar deve referir-se que os gráficos apresentados demonstram que os registos obtidos ao longo das seis campanhas são muito semelhantes, demonstrando a existência de uma certa repetibilidade.

Contudo, observa-se uma clara existência de vários impactos secundários após o primeiro impacto do martelo no batente. Esses impactos secundários são fruto da onda se propagar novamente no trem de varas em sentido oposto quando esta é reflectida na interface solo – amostrador, originando uma separação, por breves segundos, entre o martelo e o batente. Tendo perfeita noção da existência desses impactos assim como da sua origem é possível destacar o seguinte conjunto de considerações.



O número de impactos secundários diminui à medida que o número de pancadas aumenta. Por outras palavras, na primeira pancada o número e a intensidade dos golpes secundários são maiores do que na última pancada do ensaio. No caso presente, de uma forma geral a primeira pancada do martelo apresenta quatro impactos, sendo o primeiro relativo à pancada principal. O último desses quatro impactos cessa por volta dos 40 ms. Por seu lado, na última pancada de cada ensaio, esta apresenta três impactos, sendo novamente o primeiro correspondente à pancada principal. O terceiro impacto cessa por volta dos 20 ms, sendo então claramente visível que o número de impactos secundários assim como as suas intensidades diminuem com o aumento do número de pancadas.

Outra conclusão a retirar da análise aos registos gráficos é o facto de a intensidade dos golpes de cada pancada diminuir à medida que a profundidade de ensaio aumenta. Por outras palavras, a primeira pancada de um ensaio realizado a um metro de profundidade e a dois, apresenta de igual modo quatro impactos. Contudo, a intensidade destes é menor no segundo caso (Figuras 7.1 a 7.12).

## 8. CONCLUSÕES

De acordo com o estudo efectuado é possível estabelecer algumas conclusões que em seguida se procuram destacar.

1. Em primeiro lugar, considera-se conveniente fazer referência à simplicidade e utilidade do sistema de aquisição de dados, o SPT ANALYZER, que permite verificar a qualidade dos ensaios em tempo real, bem como a sua eficácia.
2. Os valores obtidos através das seis campanhas de ensaio realizadas exibem um elevado grau de qualidade, exceptuando os valores correspondentes à primeira pancada de cada campanha, o que se deve às características do sistema de libertação do martelo. O mesmo se pode dizer relativamente à qualidade dos registos gráficos que exibem boa sobreposição das curvas de força e velocidade (em mais de 95% dos casos).
3. Da observação desses registos conclui-se que a dinâmica de funcionamento do equipamento utilizado confirma as teorias de propagação de onda apresentadas por PALACIOS (1977) e SCHMERTMANN & PALACIOS (1979). Estes autores defendem que aquando do impacto entre o martelo e o batente se gera uma onda de compressão que se propaga tanto no martelo como no trem de varas com velocidades iguais mas sentidos opostos. Dado o comprimento do martelo ser muito inferior, quando comparado com o do trem de varas, a onda de compressão atinge a sua extremidade superior num espaço de tempo muito inferior do que no trem de varas. Uma vez que essa extremidade é livre, a onda é reflectida percorrendo novamente o martelo mas desta vez em sentido descendente e como onda de tracção. A medida que percorre o martelo essa onda vai anulando a onda de compressão que ainda esta a percorrer o martelo no sentido ascendente. Quando a onda de tracção chega à interface martelo - batente o martelo encontra-se livre de qualquer tipo de tensão.

Uma vez que nesse momento o martelo ainda se encontra em contacto com o batente, é gerado um novo pulso de compressão nessa interface, já que o trem de varas ainda se encontra sujeito a compressão da onda inicial. Esse novo pulso,

que possui um valor de tensão menor, propaga-se novamente pelo martelo e o trem de varas, originando uma onda de compressão em degraus neste último, sendo que a forma da onda depende fundamentalmente da razão entre as áreas do martelo e do batente.

Quanto à propagação da onda de compressão no trem de varas, os autores defendem que esta é reflectida na interface solo – amostrador percorrendo novamente o trem de varas como onda de tracção, tal como sucede no martelo. Quando esta atinge a interface martelo - batente o seu valor excede o da compressão então existente nessa interface, originando a separação entre o martelo e o trem de varas. Esse instante, de valor numérico  $2l/c$  ( $l$  comprimento do trem de varas e  $c$  valor da velocidade de propagação de impulsos de tensão), foi denominado de “tension cutoff” ou corte de tracção. Nesse momento a transferência de energia entre o martelo e o batente é interrompida, contudo, o martelo irá embater novamente no batente originando um segundo impacto e por consequente uma nova onda de compressão. De salientar que este ciclo é repetido até a onda de tracção, que percorre o trem de varas no sentido, ascendente, possuir um valor inferior a da onda de compressão existente na interface martelo - batente

Estes autores defendem igualmente que estes impactos secundários ocorrem muito tardiamente não aumentando significativamente a penetração do amostrador.

4. Esses impactos foram perfeitamente observáveis nos registos gráficos obtidos ao longo dos ensaios. Nos mesmos registos foi ainda observado que os impactos secundários diminuem com o aumento do número de pancadas e da profundidade de ensaio. Esta conclusão vem confirmar as conclusões apresentadas por SCHMERTMANN & PALACIOS em 1979 e CAVALCANTE em 2002, entre outros.
5. Com base nos registos da força, velocidade, deslocamento do amostrador e da eficácia obtidos ao longo das várias campanhas é possível concluir que:
  - a) A frequência de queda do martelo influencia claramente os valores de força, velocidade, penetração do amostrador, mas principalmente a

eficácia do ensaio, sendo que quanto mais elevado o ritmo do ensaio maior serão esses valores, chegando inclusive a ultrapassar os valores teóricos máximos (no caso da eficácia com valores superiores a 100%). De modo a excluir esta ocorrência sugere-se a introdução de um tempo de espera entre cada pancada.

- b) Quanto ao uso de vários tipos de batentes, estes não parecem influenciar de modo significativo os valores dos parâmetros registados, uma vez que estes se apresentam muito semelhantes nos dois furos de batente diferente (F1 e F3). Note-se que a bibliografia existente defende que um aumento da área de secção provocará uma diminuição da eficácia do ensaio, tal como observado nas campanhas realizadas a dois metros de profundidade.
  - c) Ainda relativamente ao uso de diferentes batentes, considera-se que a frequência de queda do martelo influencia claramente mais os valores, do que a área de secção do batente.
6. Outra conclusão de igual importância é relativa a altura de queda do martelo. Realizaram-se duas medidas, na mesma máquina (mas em furos diferentes), da determinação da altura de queda do martelo. Estes distavam 1 cm entre eles, indicando assim, que ao longo de uma campanha de ensaio o valor da altura de queda do martelo poderá não ser constante e por consequente o valor da energia potencial disponível também não, influenciando desse modo o valor da eficácia para cada pancada.
7. Os valores de  $N_{60}$ , relativos aos ensaios realizados, demonstram a grande importância de quantificar a eficácia energética do ensaio, dado que pequenas variações nos valores da energia medida provocam uma diferença significativa dos resultados, conforme confirmado pelo cálculo. Os valores foram calculados segundo o modelo de TERZAGHI (1948) e SCHMERTMANN & PALACIOS (1979), tendo-se obtido os seguintes valores reais de  $N_{60}$  (Quadro 8.1).

Quadro 8.1: Valores de  $N_{60}$  relativos aos ensaios realizados

Furo	Profundidade (m)	$N_{SPT}$ obtido no ensaio	Média $E_{medida}$ (Joules)	$N_{60}$ real (arredondado)
F1	1	19	482,1	33
	2	23	479,4	39
F2	1	21	481,4	36
	2	22	480,4	38
F3	1	19	482,6	33
	2	20	482,2	34

## 9. TRABALHOS FUTUROS

Uma vez que o assunto da eficácia da energia no ensaio SPT é um dos temas mais problemáticos do mundo dos ensaios “in situ” sugerem-se em seguida alguns temas que poderão ser alvo de futuras pesquisas:

- a) Realização de ensaios em trens de varas longos, da ordem dos 20m, de modo a poder quantificar quais as implicações do comprimento do trem de varas na eficácia do ensaio.
- b) Realização do ensaio introduzindo vários tempos de paragens entre as pancadas de modo a avaliar quais os efeitos e tentando determinar qual o tempo óptimo de espera entre pancadas.
- c) Realização de medidas da altura de queda do martelo de modo a aprofundar os conhecimento relativos à influência desta na eficácia do ensaio.
- d) Realização de ensaios com vários tipos de batentes a profundidades maiores das utilizadas nesta dissertação, afim de confirmar as teorias apresentadas sobre a influencia da área de secção do batente nos valores da eficácia.
- e) Utilização de equipamentos diferentes dos usados nesta dissertação de modo a poder avaliar a influências dos diferentes dispositivos de disparo.

- f) Realização de ensaios em vários tipos de solo de modo a poder avaliar a influência do tipo de solo na eficácia do ensaio.

## 10. BIBLIOGRAFIA

ABOU – MATAR, H. & GOBLE, G.G. (1997), “SPT Dynamic Analysis and Measurements”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* – ASCE – vol. 123, n10, pp. 921-928.

ABOU – MATAR, H. & GOBLE, G.G. (1999), Closure by “Discussion on SPT Dynamic Analysis and Measurements”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* – ASCE – vol. 125, n6, pp. 535-536.

AOKI, N. e CINTRA, J. C. A. (2000), “The Application of Energy Conservation Hamilton’s Principle to the Determination of Energy Efficiency in SPT Tests” In: *Proceedings of the VI International Conference on the Application of Stress – Wave Theory to Piles*, pp. 457-460, São Paulo.

AOKI, N. e VELLOSO, D. A. (1975), “Na Approximated Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles”, In: *Proceedings of the V Panamerican Conference on Soil and Foundation Engineering*, vol.5, pp.367-377, Buenos Aires

ASTM D1586 (1958), “Standard Method for Penetration Test and Split – Barrel Sampling of Soils”, In: *Annual Book of Standard*, pp.1110-1112, Philadelphia.

ASTM D1586 (1984), “Standard Method for Penetration Test and Split – Barrel Sampling of Soils”, In: *Annual Book of Standard*, Philadelphia.



BELICANTA, A. (1985), Energia Dinâmica no SPT – *Resultados de uma Investigação Teórico – Experimental*, Dissertação de M.Sc., São Paulo, SP, Brasil.

BELICANTA, A., DIONISI, A., MACHADO, J.R.A. et al. (1994), “Medidas da Energia Dinâmica no Ensaio SPT, Sistema IPT” In: *Anais do X COBRAMSEF*, vol.1, p. 507-514.

BROMS, B.B. & FLODIN, N. (1988), “History of Soil Penetration Testing”, In: *Proceedings of the Penetration Testing – ISOPT – 1*, pp. 178-186, Orlando

BUTLER, J. J., CALIENDO, J. A. & GOBLE, G. G. (1998), “Comparison of SPT Energy Measurements Methods”, In: *Proceedings of the Geotechnical Site Characterization*, v.2, pp. 901-905, Atlanta, EUA.

CAMPANELLA SY, A. (1994), “Recent Developments in Energy Calibration of Penetration Test at UBC”, In: *Proceedings of the XII ICSMFE*, pp.151-156, New Delhi.

CAVALCANTE, E. H. (2002). “Investigação Teórico-Experimental Sobre o SPT” Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 430p.

CAVALCANTE, E. H., DANZIGER, F.A.B., DANZIGER, B.R., BEZERRA, R.L., (2002)”. Medida de energia do SPT: Instrumentação para registros de força e de velocidade nas hastes”. XII COBRAMSEG – I CLBG – III SBMR, vol.1, pp. 97-106.

CESTARI, F (1990). "Prove Geotecniche In Sito". I Edizione. Ed. Geograph s.n.c, pp. 207-138.

CLAYTON, C.R.I. (1990), "SPT Energy Transmission: Theory Measurement and Significance", *Ground Engineering*, vol. 23, n10, pp. 35-43.

CRUZ, N. (1995). "A Avaliação de Parâmetros Geotécnicos pelo Dilatômetro de Marchetti". Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra, pp. 62-75.

De MELLO, V.F.B. (1971), "Standard Penetration Test". In: *Proceedings of the IV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol.1, pp. 1-86, Porto Rico.

DÉCOURT, L. (1989), *The Standard Penetration Test – State of Art Report*. In: XII ICSMFE, vol.4, Rio de Janeiro.

DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R. (1978), "Capacidade de Carga de Estacas a Partir de Valores do SPT", In: *Anais do VI COBRAMSEF*, pp. 45-53, Rio de Janeiro.

FAIRHURST, C. (1961), "Wave Mechanics of Percussive Drilling", *Mine & Quarry Engineering*, vol. 27, n3, pp. 122-130; vol.27, n4, pp. 169-178; vol.27, n7, pp. 327-328.

FARRAR, J.A. (1998), "Summary of Standard Penetration Test (SPT) Energy Measurement Methods", In: *Proceedings of the Geotechnical Site Characterization*, vol. 2, pp. 919-926, Atlanta, EUA.

FLETCHER, G.F.A. (1965), "Standard Penetration Test: Its Uses and Abuses", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE* – vol. 91, nSM4, pp. 67-75.

GIBBS, H.J. & HOLTZ, W.G. (1957), "Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing", In: *Proceedings of the IV ICAMFE*, vol. 1, pp. 35-39, Londres

HVORSLEV, M.J. (1949), "Sampling Methods and Requirements", *Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purpose*, 1 ed., Chapter 4, Mississippi, USA.

KOVACS, W.D. (1979), "Velocity Measurement of Free – Fall SPT Hammer", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE* – vol. 105, nGT1, pp. 1-10.

KOVACS, W.D. (1980), "What Constitutes a Turn?", *Geotechnical Testing Journal*, vol. 3, n3, pp. 127-130

KOVACS, W.D. (1981), "Results and Interpretation of SPT Practice Study", Technical Note on *Geotechnical Testing Journal – ASTM* – vol. 4, n3, pp. 126-129.

KOVACS, W.D. (1994), "Effects of SPT Equipment and Procedures on the Design of Shallow Foundations on Sand", *Proceedings of the Settlement '94, ASCE, Geotechnical Special Publication*, vol. 1, n40, pp. 121-131, New York.

KOVACS, W.D., EVANS, J.C. & GRIFFITH, A.W. (1975), *A Comparative Investigation of the Mobile Drilling Company's Safe T-Driver with the Standard Cathead with Manila Rope for the Performance of the Standard Penetration Test*, Report of the Geotechnical Engineering, Purdue University, W. Lafayette, August, 127p,

KOVACS, W.D., GRIFFITH, A.W. & EVANS, J.C (1978), "An Alternative to the Cathead and Rope for the Standard Penetration Test", *Geotechnical Testing Journal*, vol. 1, n2, pp. 72-81.

KOVACS, W.D. & SALAMONE, L.A. (1982), "SPT Hammer Energy Measurement", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE* – vol.108, nGT4, pp. 599-620.

KOVACS, W.D. & SALAMONE, L.A. (1984), Closure of Discussion on "SPT Hammer Energy Measurement", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE* – vol.110, n4, pp.562-563.

LIAO, S.S.C. & WHITMAN, R.B. (1986), "Overburden Correction Factors for SPT in Sand", *Journal of Geotechnical Engineering – ASCE* – vol. 112, n3, pp. 373-377.

LO PINTO, V.J. (1966), Discussion on "Standard Penetration Test: Its Use and Abuse", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE* – vol.92, nSM1, pp. 195-196.

MATSUMOTO, T., SIKIGUSHI, H. & YOSHIDA, H. (1992), "Significance of Two Point Strain Measurement in SPT", *Soils and Foundations – JSSMFE* – vol.32, n2, pp. 67-82.

MOHR, H.A. (1966), Discussion on "Standard Penetration Test: Its Use and Abuse", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE* – vol.92, nSM1, pp. 196-199.

MORGANO, C.M. & LIANG, R. (1992), Energy Transfer in SPT – Rod Length Effect, In: Proceedings of the fourth International Conference on the Application of Stress – Wave Theory to *Piles*, vol.1, pp. 121-127, Netherlands.

NIXON, I.K. (1982), “Standard Penetration Test State – of – the – Art Report”, In: Proceedings of the ESOPT – 2, Penetration Testing, vol.1, pp. 3-24, Amsterdam.

ODEBRECHT, G.P., SCHNAID, F., ROCHA, M.M & E., BERNARDES, (2004). “Energy measurements for standard penetration test and the effects of the length of rods”. 2<sup>nd</sup> Int. Site Characterization, ISC’2, Porto, Portugal. Vol. 1, pp. 351-358.

PALACIOS, A. (1977), *Theory and Measurements of Energy Transfer During Standard Penetration Test Sampling*, Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, USA.

PECK, R.B., HANSON, W.E. and THORNBURN, T.H. (1953), “Techniques of Subsurface Investigation”, *Foundation Engineering*, 1<sup>a</sup> edição, New York.

PDI (1999), “PDA – W Users Manual”, Pile Dynamics Inc., Ohio.

PDI (1999), “SPT ANALYZER – SPT Users Manual”, Pile Dynamics Inc., Ohio, 30p.

PDI (2001), “Sistemas para medição de altura de queda e de velocidade do martelo do SPT”, *página da Internet* [www.pile.com](http://www.pile.com).

RIGGS, C.O. (1986), "North American Standard Penetration Test Practice: An Essay", In: *Proceedings of the Conference on Use of In – Situ Test in Geotechnical Engineering* – ASCE, pp. 949-965.

RIGGS, C.O., MATHES, G.M. & RASSIEUR, C.L. (1984), "A Field Study of an Automatic SPT Hammer System", *Geotechnical Testing Journal* – ASTM – vol.7, n3, pp. 158-163.

RODRIGUES, C.; CAVALCANTE, E.; VIANA DA FONSECA, A. (2008). "Medições de energia no SPT: Primeiros registos em Portugal". XI Cong. Nacional de Geotecnia, Vol. 1, pp. 85-92 – Coimbra, Portugal.

SCHMERTMANN, J. H. (1970), "Static Cone to Compute Settlement over Sand", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* – ASCE – vol.96, nSM3, pp. 1011-1043.

SCHMERTMANN, J. H. (1976), *Interpreting the Dynamics of the Standard Penetration Test*, Final Report on Project D-636 to the Florida Department of Transportation, Research Division, Waldo Road, Gainesville, Fla. 32601.

SCHMERTMANN, J. H. (1978), "Use the SPT to Measure Dynamic Soil Properties? – Yes, But!", *Dynamic Geotechnical Testing* – ASTM – STP 654, pp. 341-355.

SCHMERTMANN, J. H. (1979), "Statics of SPT", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* – ASCE – vol.105, nGT5, pp. 665-670.

SCHMERTMANN, J. H., HARTMAN, J.P & BROWN, P.R. (1978), "Improvement Strain Influence Factor Diagrams", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE* – vol.105, nGT5, pp. 1131-1135.

SCHMERTMANN, J. H. & PALACIOS, A., (1979), "Energy Dynamics of SPT", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE* – vol.105, nGT8, pp. 909-926.

SCHNABEL, J.J. (1966), Discussion of "Standard Penetration Test: Its Uses and Abuses", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE* – vol.92, nSM2, pp. 184.

SEED, H.B., TOKIMATSU, K., HARDER, L.F & CHUNG, R.M (1985), "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resultance Evaluations, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE* – vol.111, n12, pp. 1425-1445.

SKEMPTON, A.W. (1986), "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Over consolidation", *Géotechnique*, vol.36, n3, pp. 425-447.

SY, A. & CAMPANELLA, R.G. (1993) "Standard Penetration Test Energy Measurements Using a System Based on the Personal Computer", Discussion, *Canadian Geotechnical Journal*, n30, pp. 876-882.

TEIXEIRA, A. H. (1974), "A Padronização de Sondagens de Simples Reconhecimento", In: *Anais do V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, vol.3, pp. 1-22, São Paulo.

TEIXEIRA, A. H. (1977), "Sondagens: Metodologia, Erros mais Comuns, Normas de Execução", In: *Anais do I Simpósio de Prospecção do Subsolo*, pp.41-61, Recife.

TEIXEIRA, C., ÁVILA MARTINS, J., MEDEIROS, A.C., PILAR, L., PINTO DE MESQUITA, L., NEVES FERRO, M., FERNANDES, A.P., ROCHA, A . (1962). “Carta Geológica de Portugal – Notícia Explicativa da Folha 18-C Guarda”, pp. 6-16, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

TERZAGHI, K. & PECK, R.B. (1948), “Soil Exploration”, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Chapter 7, New York.

TIMOSHENKO, S. & GOODIER, J.N. (1970), *Theory of Elasticity*, 3th Edition, New York.

TOKIMATSU, K. (1988), “Penetration Tests for Dynamic Problems – Penetrations Testing”, In: *Proceedings of the ISOPT-1*, J. DE RUITER Ed, p. 117-136.

VELLOSO, D.A. (1998), Notas de aula, Curso de Fundações, COPPE/UFRJ.

YOKEL, F.Y. (1982), “Energy Transfer in Standard Penetration Test”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE – vol.108, nGT9*, p.1107-1202.

YOKEL, F.Y. (1989), “Energy Transfer Mechanism in SPT”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE – vol.115, n9*, p. 1331-1336.



# ANEXOS

Autor	H. A. MOHR		TERZAGHI & PECK		CÓDIGO DA CIDADE DE NOVA YORK		C. E. NEW ENGLAND DIVISION	
Amostrador	Tubo extra pesado $D_{int} = 33,4 \text{ mm}$ $D_{ext} = 24,3 \text{ mm}$		Raymond $D_{int} = 33,4 \text{ mm}$ $D_{ext} = 24,3 \text{ mm}$		$D_{ext} = 63,5 \text{ mm}$		$D_{ext} = 76,2 \text{ mm}$	
Martelo	0,62 kN		0,62 kN		1,34 kN		1,34 kN	
h queda	$\pm 762 \text{ mm}$		762 mm		457,2 mm		457,2 mm	
Solo	Designação	Golpes/305 mm	Designação	Golpes/305 mm	Designação	Golpes/305 mm	Designação	Golpes/305 mm
Compacidade e de Areia e Silte			Muito fofa	< 4	Muito fofa		Muito fofa	< 8
	Fofa	< 9	Fofa	4 – 10	Fofa	0 – 15	Fofa	8 – 16
	Média	9 -13	Média	4 – 30	Média		Média	16 – 55
	Compacta	14 -49	Compacta	30 – 50	Compacta	16 -50	Compacta	55 – 110
	Muito compacta	> 50	Muito compacta	> 50	Muito compacta	> 50	Muito compacta	> 110
Consistência de Argilas	Mole	< 5	Muito Mole	< 2	Muito Mole	0 – 2	Muito Mole	< 8
			Mole	2 – 4	Mole	3 - 10	Mole	8 - 16
	Média	5 – 10	Média	4 -8	Média	4 -8	Média	16 - 55
	Rija		Rija	8 – 15	Rija	8 – 15	Rija	55 – 110 > 110
	Muito rija		Muito rija	15 – 30	Muito rija	15 – 30	Muito rija	
	Dura	11 - 30	Dura	> 30	Dura	> 30	Dura	